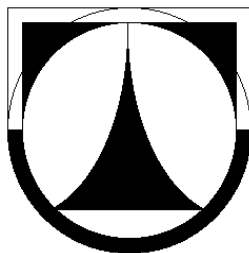


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA MATERIÁLU



DIPLOMOVÁ PRÁCE

KMT – 215

**VLIV DEFORMACE SLITINY STANAL 32
NA JEJÍ VLASTNOSTI PO VYTVRZENÍ**

**THE DEFORMATION INFLUENCE OF
THE ALUMINIUM ALLOY STANAL 32 TO ITS
PROPERTIES AFTER THE AGE HARDENING**

VERONIKA HERITESOVÁ

2006

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA MATERIÁLU



Studijní program: **M2301 Strojní inženýrství**
Obor: **2303 T 002 Strojírenská technologie**
Zaměření: **Materiálové inženýrství**

**VLIV DEFORMACE SLITINY STANAL 32
NA JEJÍ VLASTNOSTI PO VYTVRZENÍ**

**THE DEFORMATION INFLUENCE OF THE ALUMINIUM
ALLOY STANAL 32 TO ITS PROPERTIES
AFTER THE AGE HARDENING**

Veronika Heritesová

KMT – 215

Vedoucí diplomové práce: Doc.Ing.Karel Daňourek,CSc.
Konzultant diplomové práce: Ing.Karel Plaček,CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 64
Počet tabulek: 21
Počet grafů: 23
Počet obrázků: 19

V Liberci, 26.května 2006

- Originál zadání -

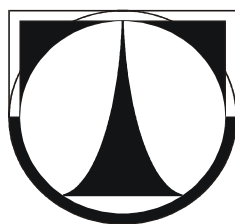
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA MATERIÁLU

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1, Česká Republika

Tel.: 48 535 3108, fax: 48 535 3535



ANOTACE

JMÉNO:	Veronika Heritesová
STUDIJNÍ PROGRAM:	M2301 Strojní inženýrství
OBOR:	2303 T 002 Strojírenská technologie
ZAMĚŘENÍ:	Materiálové inženýrství
ZADÁNÍ PRÁCE:	Vliv deformace slitiny Stanal 32 na její vlastnosti po vytvrzení
ČÍSLO PRÁCE:	KMT – 215
VEDOUCÍ PRÁCE:	Doc.Ing. Karel Daňourek, CSc.
KONZULTANT:	Ing. Karel Plaček, CSc.

Tato diplomová práce se zabývá mechanickými vlastnostmi a režimem umělého stárnutí výlisků z hliníkové slitiny AlMgSiSnBi s různým stupněm deformace provedené po rozpouštěcím ohřevu.

První část diplomové práce obsahuje informace o základních vlastnostech hliníku a jeho slitin se zaměřením na slitiny typu Al-Mg-Si a řeší způsoby zlepšování hodnot mechanických vlastností, zejména jejich tvářením a tepelným zpracováním. Druhá část práce popisuje podmínky a průběh provedených zkoušek, včetně vyhodnocení v podobě vytvrzovacích křivek.

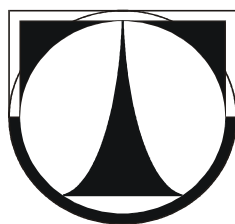
TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1, Czech Republic

Tel.: 48 535 3108, fax: 48 535 3535



ANNOTATION

NAME:	Veronika Heritesová
STUDY PROGRAM:	M2301 Mechanical engineering
SPECIALIZATION:	2303 T 002 Engineering technology
FOCUSING:	Material science
THEME OF THESIS:	The deformation influence of the aluminium alloy Stanal 32 to its properties after the age hardening
NUMBER OF THESIS:	KMT – 215
LEADER OF THESIS:	Doc.Ing.Karel Dad'ourek, CSc.
CONSULTER:	Ing.Karel Plaček, CSc.

This diploma thesis is aimed on mechanical properties and artificial age hardening of the aluminium alloys AlMgSiSnBi compacts with the different deformation degree valued after the solution annealing.

The first part of the diploma thesis includes information about the basic properties of the aluminium and its alloys with the Al-Mg-Si specification. It solves to improve mechanicals properties values by the cold working and heat treatment.

In the second part of the diploma thesis, there is an experimental description contains process and conditions of the mechanical tests characterized by the hardening curves.

Dovoluji si poděkovat společnosti Alcan Děčín Extrusions s.r.o. za umožnění tohoto výzkumu, jmenovitě především panu Ing.Karlu Plačkovi,Csc a panu Ing.Ivu Kolaříkovi, za odborné vedení a pomoc při vypracování předkládané práce. Dále bych ráda poděkovala panu Doc.Ing.Karlu Daďourkovi,Csc, vedoucímu své diplomové práce, za odborné vedení a cenné připomínky. Zároveň děkuji i ostatním pracovníkům katedry materiálu na Technické univerzitě v Liberci, zejména panu Ing.Václavu Kubíčkovi a také panu Ing.Adamu Hotařovi, kteří se na pomoci podíleli.

Obsah:

1. Úvod	8
2. Teoretická část	
2.1 Základní vlastnosti hliníku a jeho slitin	9
2.2 Rozdělení slitin hliníku	11
2.3 Slitiny typu Al-Mg-Si	17
2.4 Možnosti zvyšování pevnostních hodnot	20
2.5 Tváření	27
2.6 Tepelné zpracování	30
2.7 Vliv tváření na průběh stárnutí	49
3. Experimentální část	
3.1 Chemické složení slitiny a její označení	50
3.2 Podmínky lisování	51
3.3 Podmínky tepelného zpracování a tažení výlisků	52
3.4 Podmínky vytvrzování	53
3.5 Mechanické zkoušky	56
3.6 Diskuse výsledků a rozbor struktury	57
4. Závěr	70
Seznam použité literatury	
Seznam příloh a přílohy	
Klíčová slova	

1. Úvod

Využití kovů a slitin je trvale v popředí zájmu všech průmyslově vyspělých států. Ke kovům, jejichž spotřeba má v posledních letech vzestupnou tendenci, patří v první řadě hliník. Důvodem jsou jeho neobvyklé vlastnosti – nízká specifická hmotnost, vysoká korozivzdornost a dobrá tvárnost, která umožňuje vyrábět z hliníkových materiálů tvarově velmi komplikované polotovary. Pro různé způsoby použití bylo vyvinuto velké množství hliníkových slitin s rozličnými kombinacemi vlastností, jako jsou mechanické hodnoty, korozivzdornost, tvárnost, svařitelnost, dekorativnost apod. Hliník tak našel uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. Rozšíření tohoto materiálu bylo ovlivněno možností podstatného zvýšení mechanických vlastností dodatečným tepelným zpracováním po tváření.

Automatové slitiny hliníku duralového typu, které obsahují relativně vysoké množství olova (0,8-1,5 hm.%), představují třetí základní skupinu obrobitelných slitin hliníku[1]. Pro svou vysokou pevnost a snadnou obrobitelnost jsou jedny z nejrozšířenějších automatových hliníkových slitin používaných v konstruktérské praxi u nás a v celé Evropě. Sílicí ekologické a legislativní tlaky vedly k tomu, že se do popředí zájmu řady metalurgických laboratoří a výrobců dostala snaha po vyloučení toxického olova z automatových slitin hliníku[1]. Proto bylo cílem projektu s názvem „Zvýšení užitných vlastností výrobků z neželezných kovů“ vyvinout bezolovnaté alternativy této skupiny automatových slitin. Slitina AlMgSiSnBi s obchodní značkou Stanal 32, použitá pro experiment diplomové práce, byla vyvinuta firmou Alusuisse Děčín s.r.o. (dnes Alcan Děčín Extrusions s.r.o.) ve spolupráci s Výzkumným ústavem kovů Panenské Břežany s.r.o. a v roce 1996 uvedena do výroby jako bezolovnatá alternativa olovnaté automatové slitiny AlMgSiPbBi. V roce 2000 byl slitině Stanal 32 udělen patent.

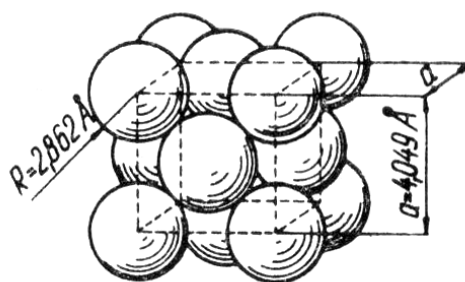
Předmětem diplomové práce bylo tepelně–mechanické zpracování výlisků ze slitiny Stanal 32. Vzhledem k tomu, že se jedná o novou slitinu, jejíž vlastnosti zatím nejsou známy v celém rozsahu možného tepelného zpracování, bylo cílem prohloubit znalosti o vlastnostech slitiny ovlivněných tvářeními za studena v závislosti na teplotě a době vytvrzování a na základě těchto zjištění stanovit optimální režim umělého stárnutí.

2. Teoretická část

2.1 Základní vlastnosti hliníku a jeho slitin

Čistý hliník

Čistý hliník (chemická značka Al) je stříbrolesklý, lehký a na vzduchu stálý kov. Krystalizuje v soustavě krychlové, krystalová mřížka je plošně centrovaná.



Obr. 2.1.1 – Prostorové rozmístění atomů hliníku v základní krystalové mřížce čistého hliníku. Pozn. $1\text{ Å} = 10^{-10}\text{ m} = 0,1\text{ nm}$ [2].

Hliník je slabě paramagnetický; elektrická i tepelná vodivost hliníku jsou velmi dobré. Hlavní fyzikální vlastnosti čistého hliníku jsou výhodné pro elektrotechniku. Dobré elektrické vodivosti hliníku se využívá k přenosu elektrické energie [3]. Významné je použití hliníku na ocelohliníková lana pro dálková vedení vysokého napětí.

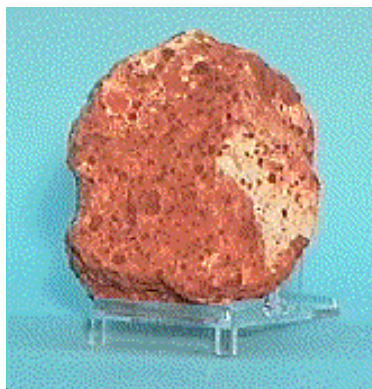
Výhodou hliníku je dobrá odolnost proti atmosférickým vlivům. Čistý hliník odolává dobře některým chemickým vlivům a působení povětrnosti, má velmi dobré vlastnosti optické, např. dobrou odrazovou schopnost pro paprsky všech vlnových délek, dá se velmi dobře tvářet za tepla i za studena a je velmi dobře svařitelný. Nehodí se pro výrobu odlitků pro poměrně špatnou slévatelnost; reznými nástroji se čistý hliník obrábí hůře než jeho slitiny (maže se).

Čistý hliník má jen malou pevnost a mez pružnosti; tyto hodnoty se sice dají zvětšit tvářením polotovaru za studena, nedosahují však ani potom hodnot obvyklých u

nejjednodušších ocelí. Tato okolnost brání využití nízké měrné váhy a jiných dobrých vlastností čistého hliníku a jeho širšímu použití jako konstrukčního materiálu[4].

Hodnoty fyzikálních, mechanických a technologických vlastností technicky čistého hliníku v žíhaném stavu jsou uvedeny v příloze v tab. 2.1.1.

Hliník se vyrábí elektrolýzou taveniny oxidu hlinitého (Al_2O_3 - korund) a kryolitu (Na_3AlF_6 - hexafluorohlinitan trisodný). Tímto způsobem se získává hliník čistoty 99,3 až 99,8%. Pro výrobu polotovarů se používá nejčastěji hliník obsahující asi 99,5% Al (ČSN 42 4005). Ve zbytku je obsaženo nejčastěji železo a křemík, které jsou ve výchozích surovinách (bauxitu) a obtížně se odstraňují, dále pak měď a zinek. V malých množstvích se v hliníku vyskytuje vanad, chrom, titan, mangan, vápník a jiné prvky [4].



Obr. 2.1.2 – Zdroje hliníku v přírodě. Nejvýznamnější rudou hliníku je bauxit ($\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot \text{AlO}(\text{OH})$ - hydroxid-oxid hlinitý)

Slitiny hliníku

Přísadou různých prvků se dají vyrobit slitiny hliníku, které mají vhodné vlastnosti pro různé způsoby použití. Hliníkových slitin se vyrábí značné množství a svými vlastnostmi se často velmi odlišují od čistého hliníku[4]. Obecně mají slitiny hliníku malou měrnou váhu, dobré mechanické vlastnosti, jsou dobře tvárné za tepla i za studena, některé z nich jsou dobře slévateľné a některé se dají zlepšit tepelným zpracováním. Mnoho typů hliníkových slitin odolává dobře korozi a jsou dobře elektricky i tepelně vodivé.

2.2 Rozdělení slitin hliníku

Jednotlivé slitiny můžeme rozdělit podle různých hledisek. Nejčastěji dělíme hliníkové slitiny podle:

- a) Chemického složení,
- b) Vhodnosti ke zpracování,
- c) Možnosti tepelného zpracování,
- d) Odolnosti proti chemickým vlivům.

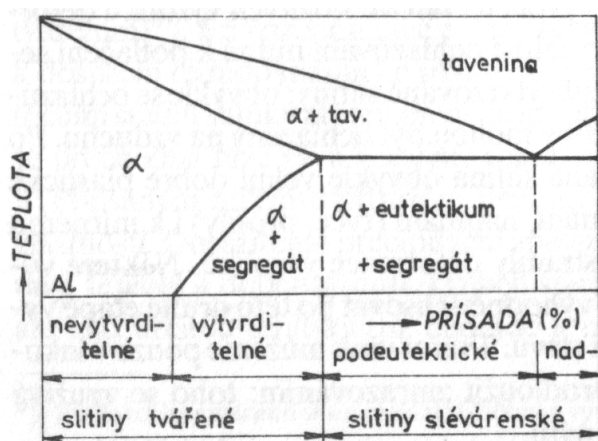
Slitiny hliníku, používané v technické praxi, jsou téměř vždy slitiny komplexní, je však možné je odvodit z několika základních binárních nebo ternárních slitin [5]. Základní binární slitiny jsou soustavy Al-Cu, Al-Mg, Al-Mn, Al-Si a Al-Zn. Za výchozí ternární slitiny hliníku lze považovat soustavy Al-Cu-Mg, Al-Cu-Ni, Al-Mg-Si, Al-Mg-Mn, Al-Cu-Zn a Al-Zn-Mg. V těchto soustavách tvoří hliník s příslušnými komponenty substituční tuhý roztok α , který je při dobré tvárnosti a houževnatosti pevnější a tvrdší než čistý hliník. Rozsah rozpustnosti je u různých soustav rozdílný a ve všech případech se s klesající teplotou zmenšuje [5].

Podle způsobu zpracování dělíme slitiny hliníku do dvou základních skupin, a to na slitiny k tváření a na slitiny k odlévání.

Přísadové prvky, obsažené ve slitinách určených ke tváření, nedosahují u těchto slitin eutektických obsahů. Za vyšších teplot tvoří s hliníkem homogenní tuhé roztoky nebo také různé intermetalické sloučeniny, jež se v litém stavu vyskytují podél hranic zrn tuhých roztoků [4]. Za nižších teplot se následkem změny rozpustnosti objevuje v jejich struktuře další fáze, sloučeniny vzniklé segregací [5]. Většinou jsou tyto slitiny dobře tvárné za tepla i za studena. Nejčastějšími přísadami v těchto slitinách jsou mangan, hořčík, měď, zinek a nikl. Mangan zvyšuje pevnost, tvárnost, rekrytalizační teplotu, odolnost proti korozi a omezuje růst zrna při rozpouštěcím žíhání. Hořčík umožňuje vytvrzování a zvyšuje odolnost proti korozi. Měď a zinek slitinu zpevňují, ale zhoršují její tvárnost a odolnost proti korozi. Nikl zlepšuje mechanické vlastnosti zejména za vyšších teplot a odolnost proti korozi. Vlastnosti některých slitin určených ke tváření jsou uvedeny v tab. 2.2.1.

Slitiny k odlévání obsahují více přísadových prvků, nejčastěji křemík, měď, hořčík, mangan, nikl. Vznikají tak až eutektické nebo nadeutektické struktury. Rozsáhlý výskyt intermetalických sloučenin však zhoršuje tvárnost těchto slitin a jejich mechanické vlastnosti [4]. Takové slitiny mají však výborné slévárenské vlastnosti, jsou dobře zabíhavé; jejich zabíhavost se zvětšuje se zvětšujícím se objemem eutektika [5]. Používají se k odlévání do pískových forem, kokil nebo na tlakové lití. Vlastnosti některých slévárenských slitin jsou uvedeny v tab. 2.2.2.

Hliník a některé jeho slitiny se mohou zpracovat tepelně jen žíháním, kterým se upravuje struktura, ale pevnost se nezvyšuje. Přísadou a vhodnou kombinací některých prvků se však dají vyrobit slitiny, které jsou schopny tzv. vytvrzování, jímž se podstatně zlepšují mechanické vlastnosti slitiny. K vytvrzování se hodí především slitiny hliníku s mědí, hořčíkem, zinkem, křemíkem a niklem. Podle toho dělíme tedy slitiny hliníku na vytvrditelné a nevytvrditelné.



Obr. 2.2.1 – Schéma binárního rovnovážného diagramu Al – přísada. Z obrázku je patrné, že vytvrzovat lze pouze slitiny s chemickým složením pod segregáční čarou [6].

Odolnost čistého hliníku proti chemickým vlivům se legováním značně mění, a to v kladném i záporném smyslu. Přísadou některých prvků se dají vyrobit slitiny se zvýšenou odolností proti určitým chemickým vlivům, přísada jiných prvků však chemickou odolnost značně snižuje (např. měď). Proto dělíme slitiny hliníku na slitiny

s menší odolností proti chemickým vlivům a slitiny se zvýšenou odolností proti chemickým vlivům [4].

Odolnost hliníku proti korozi je dána tenkou vrstvou povrchového oxidu Al_2O_3 . Tato vrstvička dosahuje na suchém vzduchu během několika minut tloušťky 10\AA , při vyšších teplotách dosahuje tloušťky až 2000\AA . Korozi v aktivnějších prostředích odolává tím lépe, čím je čistší. Neodolává hydroxidům (NaOH , KOH) a halovým kyselinám (HCl , HF). Dobrá korozní odolnost hliníku, často uměle zvýšená zesílením ochranné povrchové vrstvy anodickou oxidací, se využívá při výrobě chemických a potravinářských zařízení, ve stavebnictví a dopravě.

Slitiny hliníku k tváření

Mezi slitiny určené ke tváření, které však nejsou schopny vytvrzování, patří dvousložkové slitiny typu Al-Mn a Al-Mg. Jsou to slitiny se středními mechanickými hodnotami a dobrou odolností proti korozi [5].

Slitiny typu Al-Mn se používají s obsahem manganu do 1,5%. Průmyslově se vyrábí pouze slitina AlMn1, která má v měkkém stavu hodnotu meze pevnosti $R_m=130\text{MPa}$ a ve stavu deformačně zpevněném až 220MPa . Tyto slitiny jsou často používány jako levnější náhrada čistého hliníku, mají dobrou odolnost proti korozi a dobrou svařitelnost.

Slitiny typu Al-Mg se nevytvrzují, protože malé zvýšení pevnosti je provázeno velkým snížením tažnosti. Používají se slitiny s obsahem hořčíku do 5%. Slitiny s vyšším obsahem hořčíku mají sklon ke korozi po hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení. Slitiny jsou dobře svařitelné. Dají se výborně povrchově upravovat, leštěním nebo anodickou oxidací (eloxováním), přičemž získaný lesk je vysoký a trvalý, a to i v nepříznivých podmínkách. Odolávají dobře působení mořské vody.

Tvářené vytvrzované slitiny jsou vícesložkové a tvoří tři hlavní skupiny, Al-Cu-Mg-(Ni), Al-Mg-Si a Al-Zn-Mg-Cu.

Slitiny typu Al-Cu-Mg-(Ni) představují nejvíce používané materiály. Zejména jde o tzv. duraly, slitiny AlCu4Mg, AlCu4Mg1, a AlCu4Mg1Mn. Jejich předností je přirozené

stárnutí. Po vytvrzení dosahují značné pevnosti, až 530MPa. Jejich odolnost proti korozi je ale snížena. Hlavním výrobkem z těchto slitin jsou plechy, povrchově chráněné proti korozi tenkou vrstvou hliníku (tzv. plátované duraly). Maximální konstrukčně využitelná teplota těchto duralů v zatíženém stavu je asi 150°C. Slitiny Al-Cu-Mg-Ni jsou vhodné pro dlouhodobou funkci za teplot až 300°C (např. jako součásti motorů). V České republice je používána slitina AlCu2Mg2Ni.

Slitiny typu Al-Zn-Mg-Cu jsou nejpevnějšími slitinami hliníku. V České republice je normována pouze jedna slitina, AlZn6Mg2Cu, která po tepelném zpracování dosahuje pevnosti $R_m=500$ až 580MPa při tažnosti $A=15$ až 5%. Ve vytvrzeném stavu jsou náchylné k interkrystalické korozi a korozi praskání, proto se často plátují.

Slitiny typu Al-Mg-Si lze tepelným zpracováním vytvrdit na hodnotu pevnosti $R_m=170$ až 270MPa. Jsou dobře tvárné a svařitelné. Mají dobrou korozní odolnost a schopnost povrchových úprav. Používají se zejména v letectví, stavebnictví a v bytové architektuře. Více o této skupině hliníkových slitin bude rozepsáno v kapitole 2.3.

Slitiny typu Al-Li patří k vývojovým slitinám. Lithium je vysoce reaktivní prvek, snadno oxidující na vzduchu, proto jsou slitiny s lithiem taveny a odlévány v ochranné atmosféře argonu nebo ve vakuu, příp. na vzduchu pod krycí struskou. Binární slitiny mají většinou nízkou tažnost a velkou křehkost, proto hlavní směr vývoje představují komplexně legované slitiny, jako je např. slitina Al-Cu-Li-Mg-Zr-Mn (s obsahem prvků 0,05-3,30%Cu; 1,80-2,80%Li; 0,20-6,00%Mg; 0,04-0,16%Zr; max.0,1%Mn). Hlavní přínos těchto slitin spočívá v nízké hmotnosti (2470 až 2620kg.m⁻³) a zvýšeném modulu pružnosti v tahu (77,5-81,2GPa). Pevnost v tahu má hodnotu $R_m = 420$ až 600MPa. Nově vyvíjené slitiny obsahují velmi malé přísady scandia, berylia a yttria, příp. kadmia.

Slitiny hliníku na odlitky

Nevytvrditelné slitiny hliníku určené k odlévání jsou vícesložkové slitiny typu Al-Si a Al-Mg.

Slitiny typu Al-Si, tzv. siluminy, existují buď jako binární slitiny nebo v kombinaci s dalšími přísadami hořčíku a mědi. Podle obsahu křemíku se dělí na slitiny podeutektické (do 11,7%Si), eutektické (s přibližným obsahem 11,7%Si) a nadeutektické (s obsahem

11,7 až 24%Si). Mají velmi dobrou slévateľnost, která umožňuje i výrobu tvarově složitých odlitků, a to všemi běžnými slévářskými technikami. Korozní odolnost je velmi dobrá. Hodnoty mechanických vlastností těchto slitin jsou nízké, lze je zvýšit přísadami hořčíku a mědi, pak je lze vytvrzovat; už při nízkém obsahu Cu se však snižuje korozní odolnost.

Slitiny typu Al-Mg obsahují 3 až 11% hořčíku, přísadu manganu, eliminující škodlivý vliv železa (již od obsahu 0,05%Fe se zhoršuje tvářitelnost a odolnost hliníku proti korozi), a přísadu křemíku, která zlepšuje slévářské vlastnosti slitiny, ale zhoršuje vzhled povrchu. Slitiny s větším obsahem hořčíku mají horší slévářské vlastnosti, neboť při tavení, lití a krystalizaci mají sklon k značnému naplynění, a jsou tudíž náchylné k oxidaci kovu, tavenina reaguje s formovacími materiály a slitina má menší zabíhavost[4]. Potíže s oxidací během tavení se řeší přísadou berylia nebo vápníku. Slitiny tohoto typu jsou určeny především k použití v korozním prostředí (mořská voda, přímořská atmosféra nebo určitá činidla v chemickém a potravinářském průmyslu). Další oblastí je dekorativní použití, např. ve stavebnictví, architektuře. Mají nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slévářských slitin hliníku. Jsou vhodné pro rázově namáhané odlitky s náhlými změnami průřezu. Předností těchto slitin je i dobrá třísková obrobiteľnost a leštiteľnost povrchu. Opracovateľnost řeznými nástroji je střední až dobrá a zlepšuje se s větším obsahem hořčíku[4]. Ke zjemnění zrna odlévaného hliníku se používají kovové očkovací přísady, z nichž nejúčinnější je titan, který silně snižuje elektrickou vodivost.

Ze slévářských slitin hliníku se vytvrzují jednak siluminy s přísadou hořčíku, mědi a niklu, jednak slitiny typu Al-Cu s dalšími přísadami.

Mezi slitinami typu Al-Cu jsou nejčastěji používány slitiny se 4-5%Cu, téměř vždy se zjemňující přísadou titanu a s přísadami hořčíku, příp. stříbra. Slitiny bez obsahu hořčíku a s přísadou niklu vykazují i dobrou stabilitu mechanických vlastností při dlouhodobé expozici za zvýšených teplot. Slitiny s obsahem mědi v rozmezí 8-10% mají vysokou odolnost proti opotřebení. S rostoucím obsahem mědi vzrůstá i třísková obrobiteľnost, špatná korozní odolnost se však dále zhoršuje. Takové slitiny se používají

na odlitky značně namáhané při vyšších teplotách, např. hlavy válců a písty větších rozměrů.

Slitiny typu Al-Zn-Mg mají obvykle lepší slévárenské vlastnosti než slitiny typu Al-Cu nebo Al-Mg. Velice výhodnou vlastností těchto slitin je jejich schopnost přirozeného vytvrzování. Ve srovnání se slitinami Al-Cu je lepší i jejich odolnost proti korozi, může se však projevovat vyšší sklon ke korozi pod napětím, který se potlačuje přísadou 0,8 až 1,2% železa. Výborná je i rozměrová stabilita odlitků při dobré třískové obrobiteľnosti. Dobře se též svařují. V ČSN však nejsou zařazeny.

Slitiny typu Al-Li jsou určeny přednostně pro tvářené hutní polotovary, avšak podle potřeby mohou být použity i pro odlitky. Vzhledem k vysoké reaktivitě lithia se vzdušnými plyny se tavení a odlévání těchto slitin provádí pod krycí struskou, v ochranné atmosféře nebo ve vakuu.

2.3 Slitiny typu Al-Mg-Si

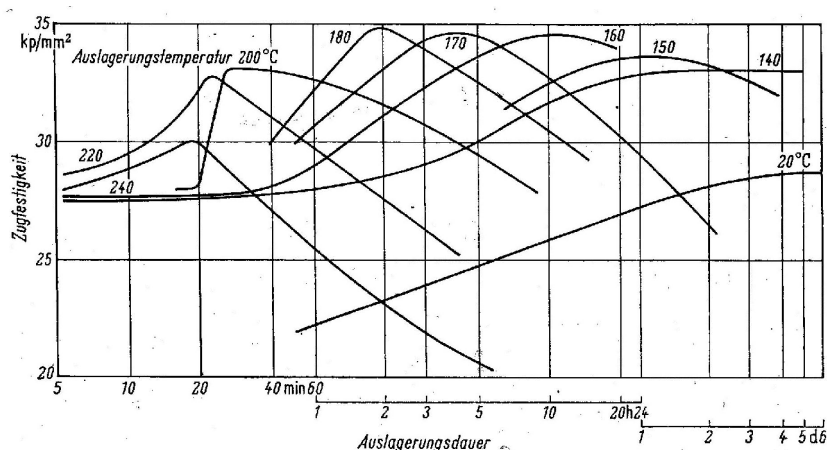
Slitiny hliníku s hořčíkem a křemíkem jsou komplexní slitiny, ve kterých vedle základních prvků bývá vždy malé množství manganu, železa, mědi. Podle našich norem (tab. 2.3.1) se v tomto typu slitiny pohybuje obsah hořčíku i křemíku od 0,4 do 1,2%. U zahraničních slitin jsou horní hodnoty obou přísad vyšší a v některých případech dosahují až 1,5%. Další přísadou v těchto slitinách je mangan. Již malé množství manganu, přibližně do 0,3%, zvyšuje mírně pevnost slitiny, jeho vyšší obsah působí spíše naopak. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že mangan váže křemík v ternární, málo rozpustné sloučenině AlMnSi a vytvřující fáze, intermetalická sloučenina, Mg_2Si je takto ochuzována o křemík[5]. Vliv manganu na pokles pevnosti se tedy projevuje tím více, čím je celkový obsah křemíku ve slitině menší. Vyšší obsahy manganu proto připouštíme u slitin s vyšším obsahem křemíku. Vedle pevnosti zvyšuje mangan dost výrazně vrubovou houževnatost. Mangan příznivě působí na zjemnění zrna, a to tím výrazněji, čím je jeho obsah vyšší[5].

U tvářených polotovarů vyráběných vytlačováním za tepla nebo kováním, působí přísada manganu na vznik textury, která vede po vytvrzení slitin ke značnému zvýšení pevnosti ve směru tváření. Rozsah tohoto strukturního usměrnění a výrazného zvýšení pevnosti, tzv. lisovacího efektu (toto téma podrobněji zpracováno v další kapitole), je možno do určité míry zmenšit rekrystalizací[5]. Význam manganu v uvedeném jevu záleží na tom, že mangan zvyšuje teplotu rekrystalizace tak vysoko, že během rozpouštěcího ohřevu slitina nerekrystalizuje. Dosáhnout toho, aby slitina rekrystalizovala, je možno buď dlouhým ohřevem na rekrystalizační teplotě (až 30hodin), nebo tím, že po tváření za tepla provedeme další tváření za studena, čímž se teplota rekrystalizace sníží[5]. Také přísada mědi do 0,6% působí příznivě na průběh rekrystalizace. Lisovací efekt se objevuje i u jiných slitin hliníku, které obsahují mangan, a zpevnění, které jím vzniká, se dá s výhodou využít v některých případech u výkovků[5]. Železo v rozsahu 0,1-0,5% mírně zvyšuje pevnost, zjemňuje zrno a snižuje rekrystalizační teplotu.

Slitiny Al-Mg-Si se vyznačují značnou stabilitou tuhého roztoku, a proto po rozpouštěcím ohřevu při teplotě 500 až 540°C nemusí být ochlazovány takovou

rychlostí, jako např. slitiny Al-Cu-Mg [3]. Stabilita tuhého roztoku je tím větší, čím nižší je obsah křemíku proti obsahu hořčíku, tedy čím více se obsah křemíku rovná stechiometrickému poměru ve sloučenině Mg_2Si [5]. Takové slitiny lze ochlazovat i v proudu vzduchu. To má výhodu především proto, že se ochlazované polotovary méně bortí a není je třeba nákladně rovnat. Při vyšším obsahu křemíku je však nutné ochlazování ve vodě [5].

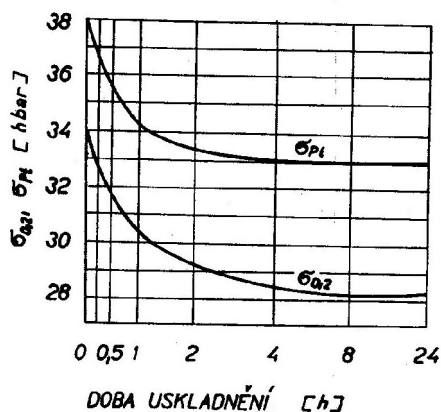
Zvýšená stabilita tuhého roztoku se projevuje velmi výrazně při stárnutí. Je třeba, aby stárnutí probíhalo uměle, tedy při zvýšených teplotách v rozsahu 160 až 180°C. Podle teploty stárnutí se řídí délka prodlevy na teplotě.



Obr. 2.3.1 – Vliv teploty a doby vytvrzování na pevnost slitiny AlMgSi [7].

Vliv teploty a doby umělého stárnutí na mechanické hodnoty, resp. na pevnost slitiny AlMgSi je vidět na obr.2.3.1. Zobrazuje vytvrzovací křivky pro slitinu chemického složení 0,6-1,4% Mg, 0,6-1,6% Si, <1% Mn, <0,3% Cr. Optimální pevnosti, jak je zřejmé, dosahuje slitina právě v rozmezí teplot 160 až 180°C. Výše pevnosti a meze pružnosti záleží do určité míry na tom, za jakou dobu po ochlazení je slitina precipitačně vytvrzena při zvolené teplotě. Doba mezi ochlazením a vytvrzováním, tedy doba přirozeného stárnutí, způsobuje zřetelný pokles obou pevnostních hodnot, což ukazuje obr.2.3.2. Je-li však slitina ihned po ochlazení ohřátá na teplotu 50 až 160°C, po dobu několika minut, k poklesu mechanických vlastností již nedojde. Obvykle se při

tepelném zpracování postupuje tak, že je slitina po ochlazení okamžitě precipitačně vytvrzována při zvýšené teplotě 160° po dobu 4 až 6 hodin.



Obr. 2.3.2 – Vliv doby přirozeného stárnutí (při pokojové teplotě 20 °C mezi ochlazením a precipitačním vytvrzováním) na mechanické vlastnosti slitiny AlMgSi1 [5].

Pevnost těchto slitin může být ještě dále zvýšena tvářením za studena po předchozím precipitačním vytvrzování. S ohledem na nižší pevnost a dobrou tažnost po vytvrzení, je tváření za studena běžně používáno.

Slitiny Al-Mg-Si patří k důležitým elektrovedným slitinám. Používají se na výrobu drátů a pásů pro elektrotechnické účely. Jsou dodávány ve stavu měkkém nebo zpevněném pro tažení za studena (dráty) a ve stavu po vytvrzení[5].

2.4 Možnosti zvyšování pevnostních hodnot

Pevnost materiálu se obecně definuje jako odolnost materiálu proti porušení. Jestliže však probíhá deformace mechanismem pohybu dislokací, je možno pevnost považovat za míru odporu proti pohybu dislokací[8]. Přesnou fyzikální veličinou, která odpovídá této definici, je mez pružnosti, resp. smluvní mez 0,2. V praxi je však více používaná mez pevnosti a u hliníkových slitin bývá častěji závaznou hodnotou oproti mezi pružnosti.

Ideální mřížka vykazuje malý odpor proti pohybu dislokací, a proto se různými způsoby připravují v materiálu „vady“ ve stavbě mřížky, které materiál zpevňují. Toho lze ve struktuře docílit existencí [8]:

- tuhého roztoku
- dislokace
- hranice zrn
- deformace v okolí vyloučených částic.

Pokud posuzujeme mechanické vlastnosti též v závislosti na směru, pak se musí ještě počítat s vlivem:

- krystalické anizotropie
- anizotropie strukturálních útvarů.

U polotovarů se většinou nevyskytuje pouze jeden z uvedených mechanismů, nýbrž jejich kombinace. Například slitina zpevněná deformací mřížky vlivem koherentně vyloučených částic, mívá vždy určitý podíl legur v tuhém roztoku, obsahuje více či méně dislokací a hranic zrn[8]. Kombinací těchto mechanismů lze tedy docílit různých mechanických vlastností pro různé způsoby použití.

Zpevňování legováním

Přidáme-li do mřížky čistého kovu atom jiného prvku, změní se jeho elektronová struktura. Přítomnost většího počtu jiných atomů v základní mřížce narušuje její uspořádání, mění se rozměry mřížky, popř. i její typ, a při větších rozdílech způsobí i elastické deformace krystalové mřížky tuhého roztoku[3]. Čím je legující prvek

podobnější základnímu kovu, tím je rozsah tuhých roztoků větší. Při tvorbě tuhého roztoku se uplatňují nejen rozdílné velikosti atomů, ale i elektrochemický faktor a rozdíl valencí[3]. Přísadou slitinových prvků k hliníku vznikají obvykle tuhé roztoky s omezenou rozpustností[4]. Chemická interakce, způsobená rozdílnou rozpustností legujících atomů, může vyvolat segregaci atomů legujících prvků[3]. Přidá-li se do základního kovu prvek s větší valencí, čímž vznikne kladný rozdíl valence, dojde ke shlukování legujících prvků v mřížce, a tím se tvoří malé oblasti segregátů.

Množství rozpuštěné přísady se s teplotou mění. Rozpouštění příměsí v základní mřížce kovu dává materiálu výhodnou kombinaci mechanických vlastností – při vysoké pevnosti vysokou tažnost. Jedná se o tzv. přirozenou pevnost materiálu, která se při tváření nedá dočasně odstranit, což způsobuje při vyšších legurách potíže při výrobě polotovarů[8].

Nejdůležitější změnou způsobenou legováním hliníku je tedy zlepšení mechanických vlastností, zejména pevnosti a meze pružnosti, při současném snížení tažnosti. Přísadou slitinových prvků k čistému hliníku vznikají tedy slitiny, které mají vyšší pevnost než čistý hliník, a mají proto daleko větší technickou důležitost z hlediska namáhavých konstrukcí. S mechanickými vlastnostmi se mění obvykle i vlastnosti fyzikální, popř. chemické. Přísadou některých prvků získávají slitiny hliníku další možnost zlepšovat své mechanické vlastnosti, a to tepelným zpracováním.

Zpevňování plastickou deformací

Dislokační zpevnění, které vzniká tvářením za studena, je způsobeno růstem hustoty dislokací a jejich hromaděním na překážkách. Plastická deformace, k níž při působení vnějších sil dochází, se nejčastěji uskutečňuje skluzem, a to přednostně v rovinách a směrech nejhustěji obsazených atomy[3]. Zpevňování při skluzovém mechanismu je vyvoláno vzájemnou interakcí mezi pohybujícími se dislokacemi v aktivních skluzových rovinách a ostatními dislokacemi. Skluz je tedy umožněn pohybem dislokací v aktivní skluzové rovině při napětí, které je větší než kritické skluzové napětí[3]. Jeho hodnota závisí nejen na typu kovu, na jeho čistotě a stavu, ale i na podmínkách vnějšího namáhání, zejména teplotě a rychlosti zatěžování.

Tento typ zpevňování lze výrazněji aplikovat jen u tvarově jednoduchých polotovarů[8]. Je ovlivněno působením některých legur. Např. vlivem manganu, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, neproběhne vždy při lisování rekrytalizace a deformovaná struktura se zachovává i po tepelném zpracování. Takový materiál vykazuje vyšší hustotu dislokací než materiál rekrytalizovaný, a proto je nutno počítat s vlivem dislokací na mechanické vlastnosti lisovaných polotovarů[8]. Určité dislokační zpevnění obdrží materiál často při dokončovacích operacích. Jedná se především o rovnání profilů napínáním a o kalibrační tažení tyčí a trubek, při kterém deformace vedou k nezanedbatelnému zvýšení pevnosti v tahu a meze pružnosti a tažnost se snižuje.

Materiál ve stavu tvářeném za studena je ale v nestabilním stavu. Vlivem teploty mohou probíhat tzv. odpevňovací procesy, např. zotavení nebo rekrytalizace, a kov ztrácí zpevnění získané plastickou deformací. Odpevňovací děje závisí na teplotě, typu kovu a velikosti celkové redukce za studena. Nelze proto jednoznačně omezit teplotu použití materiálů tvářených za studena[3].

Zpevňování hranicemi zrn

Hranice zrn představují výraznou překážku pro pohyb dislokací, takže při plastické deformaci dochází k nakupení dislokací v okolí hranic a ke vzniku dalších dislokací na hranicích zrn[3]. Velikost zrn tedy značně ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Vliv hranic zrn lze vyjádřit velikostí zrn: čím je zrno menší, tím je podíl hranic zrn větší[3]. Se zmenšujícím se zrnem se tudíž pevnostní vlastnosti zvyšují. Tímto mechanismem zpevňování materiálu se zvyšuje nejen mez pevnosti a mez pružnosti, ale i hodnoty tažnosti.

K docílení vysokých mechanických hodnot je zapotřebí buď potlačit rekrytalizaci (tzv. lisovací efekt) nebo docílit jemnozrnnou rekrytalizaci. Opatření při lisování vedoucí k jemnozrnné rekrytalizaci jsou - co nejvíce snížit obsah prvků brzdicích rekrytalizaci, disperzita vyloučených fází musí být co nejmenší a slisovací poměr volit co největší, aby se co nejvíce překročil kritický stupeň deformace[8].

Co se týká teploty lisování, je nutno rozlišovat mezi materiály, u kterých se provádí nebo neprovádí tzv. kalení za matricí, a které se po lisování podrobují separátnímu rozpouštěcímu ohřevu. U prvních materiálů je vhodné volit vysokou teplotu lisování, zatímco u druhé skupiny se docílí jemné rekrytalizace tehdy, když se volí nízká lisovací teplota[8].

Posuzování velikosti deformace při průtlačném lisování je problematickou záležitostí. U přímého lisování zaostává okrajová vrstva vlivem tření o stěnu recipientu vůči středové části, důsledkem je pak nerovnoměrná deformace po průřezu. Na okraji výlisku bývá proto stupeň deformace vyšší než uprostřed, což často vede při rozpouštěcím ohřevu ke vzniku hrubozrnné rekrytalizované okrajové vrstvy, zatímco střed polotovaru bývá nerekrystalizován[8]. U výlisků nekruhového tvaru k tomu přistupuje ještě nerovnoměrná deformace vlivem rozdílného toku materiálu z kruhového tvaru čepu do profilu[8].

Mimo vlivu lisovacích podmínek určují velikost zrna, a tedy i velikost mechanických hodnot, také podmínky tepelného zpracování. Je nutno v rámci možností vyplývajících z rovnovážného diagramu volit dobu a teplotu rozpouštěcího ohřevu co nejnižší, a zároveň zajistit volbou vhodného typu pece co nejrychlejší náhřev na stanovenou teplotu[8].

U polotovarů, které se před rozpouštěcím žíháním tváří za studena, např. tažením, je výsledné zrno tím jemnější, čím vyšší byla deformace, pokud se překročí určitý kritický deformační stupeň[8].

Narozdíl od zpevnění plastickou deformací je vliv hranic zrn trvalý, protože jde o stabilní stav[3].

Zpevňování vlivem vyloučených intermetalických fází

Mezi hliníkem a slitinovými prvky může docházet k vzájemné vazbě a vzniku intermetalických fází, tvořených sloučeninami hliníku. Tyto fáze se vylučují nejčastěji mezikrystalicky a jsou většinou křehké a tvrdé. Jsou-li vyloučeny v krystalech, omezují také možnost skluzů a zvyšují tak pevnost slitiny[8]. U některých slitin se vyskytuje ve struktuře i čistý legující kov (např. křemík), který má podobný účinek. Heterogenní

slitiny tedy mají ve struktuře více složek lišících se mezi sebou svými vlastnostmi, což má vliv nejen na mechanické vlastnosti, ale např. také na odolnost proti korozi, elektrickou vodivost, vhodnost polotovaru k anodické oxidaci a leštění, obrobiteľnosť apod.

Míra zpevňování vlivem částic je silně závislá na rozložení, velikosti a způsobu vyloučení částic. Maximálního zpevnění se dosáhne vylučováním koherentních, resp. semikoherentních částic z přesyceného tuhého roztoku[8], což je metoda vytvrzování, která je blíže popsána v kapitole 2.6.

Zpevňování směrovou deformací

Krystalickou anizotropii mechanických vlastností lze ke zvýšení mechanických hodnot využívat jen tehdy, požadujeme-li vysoké hodnoty jen v určitém směru, např. u lisovaných polotovarů v jejich podélném směru. Podmínkou je krystalická textura, tedy existence přednostní orientace mřížky jednotlivých zrn v určitém směru, při které se projeví anizotropické vlastnosti polotovaru i na polykrystalickém materiálu[8]. Rozdílné vlastnosti, které lze zjistit i v průřezu plechu, drátu nebo trubky, jsou způsobeny technologií zpracování, zejména pak vlivem tření a u většiny průřezů i nerovnoměrným rozdělením deformace[3].

Anizotropie strukturálních útvarů vzniká vlivem působení směru tváření. Při lisování se seskupují vyloučené fáze řádkovitě ve směru toku materiálu, event. přítomné póry se protahují ve stejném směru a u nerekrystalizovaného materiálu je tvořena struktura zrn protáhlými ve směru lisování, které často nelze od sebe identifikovat[8]. To vše vede k ovlivňování mechanických vlastností v různých směrech výlisku. Anizotropie mechanických vlastností hraje významnou roli při zvyšování pevnostních hodnot lisovaných polotovarů.

Zpevnění rozpouštěním legur v základní mřížce hraje u vytvrditelných slitin podřadnou roli. Dislokační zpevnění hraje důležitou roli u polotovarů tvářených za studena a vzhledem k nevhodné kombinaci mechanických vlastností se u vytvrditelných slitin nepoužívá. Přesto však mohou dislokace přispívat ke zpevnění lisovaných

polotovaru, pokud při lisování ani při rozpouštěcím ohřevu neproběhne rekrystalizace. Zvýšení pevnosti u nerekrystalizovaných výlisků ve srovnání s rekrystalizovanými je znám pod pojmem lisovací efekt (presefekt). Zpevňování pomocí hranic zrn se využívá u tažených trubek záměrným předepisováním vysokého úběru před rozpouštěcím žíháním, aby vznikla co nejjemnozrnnější struktura[8]. Ovlivňování mechanických vlastností pomocí vyloučených částic se využívá formou tepelného zpracování, jehož detailní provedení je propracované a nelze od upřesňování technologie v tomto směru očekávat výraznější přínosy. Textura strukturálních útvarů je dána tokem materiálu z čepu do polotovaru a nelze ji podstatně ovlivňovat. Jinak je tomu však u krystalické textury, jejíž přítomnost způsobuje zvýšení pevnosti v určitých směrech[8].

Lisovací efekt (presefekt)

K docílení lisovacího efektu je nutné, aby si materiál zachoval nerekrystalizovanou strukturu i po rozpouštěcím ohřevu. Podmínkou pro statickou rekrystalizaci je překročení určité kritické deformace získané tvářením za studena. Tato deformace způsobuje materiálu zpevnění, kterému odpovídá určité množství energie obsažené v deformovaném materiálu[8].

Velikost zbytkového zpevnění, tedy zpevnění v nerekrystalizované struktuře u materiálu za tepla lisovaného, je závislá na lisovacích podmínkách[8]. Je tím větší, čím vyšší je slisovací poměr a čím nižší je lisovací teplota. Pro docílení lisovacího efektu je tedy nutné lisovat malým slisovacím poměrem při vysoké teplotě. Tyče, které se po lisování dále podrobují kalibračnímu tažení za studena, dosahují tímto dalšího zpevnění. Toto zpevnění se sčítá se zbytkovým zpevněním a součet může překročit zpevnění odpovídající kritickému stupni deformace[8]. Proto tažené tyče často úplně ztrácí lisovací efekt a vykazují nižší pevnost.

Během tvářením za tepla se materiál odpevňuje vlivem dynamických odpevňovacích procesů. Při nižších stupních deformace probíhá dynamické zotavení, které je v rovnováze s průběhem deformace. Nestačí-li dynamické zotavení odpevňovat deformovaný materiál, začne od určitého stupně zpevnění probíhat dynamická rekrystalizace. Z uvedeného vyplývá, že výsledná struktura materiálu tvářeného za tepla

nemusí být nutně rekrystalizovaná, i když tváření probíhá při vyšší teplotě, než která je zapotřebí pro statickou rekrystalizaci. Nerekristalizovaný materiál bývá v závislosti na teplotě, rychlosti a stupni tváření více či méně odpevněn dynamickým zotavením[8].

Pro vznik lisovacího efektu je nutná existence textury. Není dostačující, aby materiál byl nerekristalizovaný po lisování, ale je nutné, aby rekrystalizace byla potlačena i při rozpouštěcím ohřevu. Nutnou podmínkou pro zachování nerekristalizované struktury je přítomnost manganu v množství min. 0,3%. Vysoké procento manganu ve slitině přispívá k brždění rekrystalizace, přičemž se zvyšuje přetvárný odpor[8].

Značný vliv na docílení nerekristalizované struktury, a tudíž na zachování lisovacího efektu, má také homogenizační ohřev, resp. doba ohřevu, který se provádí před lisováním pro zlepšení tvářitelnosti. V průběhu homogenizace se totiž vylučují částice obsahující mangan. Ty pak v průběhu ohřevu rostou a snižují disperzitu částic. Při dostatečně velké disperzitě, tedy malé vzájemné vzdálenosti částic od sebe, blokují částice hranice subzrn vznikajících při tváření, čímž brzdí průběh rekrystalizace.

Lisovací efekt představuje ve vytvrzeném stavu zvýšení pevnosti a meze pružnosti až o 100MPa se současným snížením tažnosti[8]. Podmínkou je zachování nerekristalizované struktury. Technologická opatření zamezující průběh rekrystalizace jsou tedy následující [8]:

- vysoká teplota a krátká doba homogenizačního ohřevu,
- přítomnost manganu,
- nízký slisovací poměr,
- vysoká lisovací teplota
- u tažených polotovarů malý úběr z průřezu.

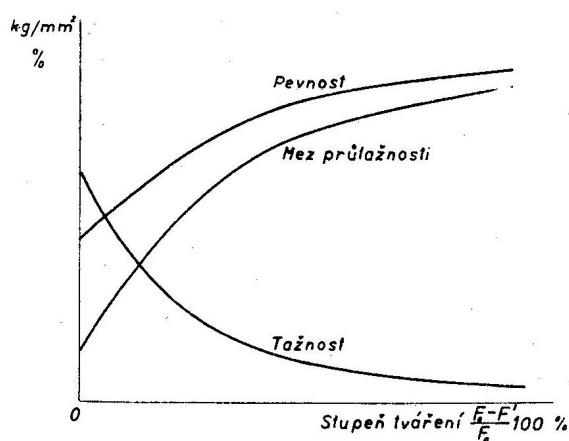
2.5 Tváření

Tvářením rozumíme zpracování kovu, při němž se mění relativní poloha jeho částic, aniž by se při tom oddělovaly[9]. Většina kovů je schopna takového zpracování, jsou tvárné. Tvářením se vlastnosti kovů mění, při čemž jsou změny zásadně stejného druhu, je-li kov při tváření namáhán tahem, tlakem či jakkoli jinak a vzrůstají-li síly spojitě (např. při válcování, tažení, lisování) nebo rázem (při kování, nýtování apod.)[9]. Změny vlastností jsou různé podle toho, provádí-li se tváření za studena nebo za tepla.

Tváření za studena

Tvářením kovů za studena se zvětšuje jejich pevnost a zmenšuje tažnost, při čemž je zmenšování tažnosti rychlejší než vzrůst pevnosti[9]. Podobně jako tažnost se zmenšuje i kontrakce. Mez pružnosti se rovněž zvětšuje, a to značně rychleji než pevnost, takže se k ní stále přibližuje. Velikost tváření se obvykle vyjadřuje procentním zmenšením průřezu, neboť při nejčastějších způsobech tváření, válcování a tažení, je účelem zmenšit průřez.

S velikostí tváření za studena se mění mechanické vlastnosti podle diagramu na obr. 2.5.1. Tvářením za studena se tedy kov zpevňuje. Po určitém zpevnění však dosáhne meze, kdy je další tváření již nemožné, neboť se kov trhá.



Obr. 2.5.1 – Zpevnění kovu tvářením za studena [9].

Tvářením za studena se spotřebuje určité množství energie. Největší její podíl se mění v teplo, jímž se tvářený kov ohřívá. Z malé části však zůstává v kovu nahromaděna jako energie potenciální. Jejím vlivem se zmenšuje elektrochemický potenciál tvářeného kovu oproti kovu vyhřátému, v elektrolytu se stávají tvářená místa anodami a korodují[9]. Proto podléhá kov různým chemickým vlivům snáze tím, čím intenzivněji byl za studena tvářen.

Tváření za studena se projevuje také na struktuře. Nejdříve se objevují skluzové čáry na krystalech pro nejpříznivěji orientované skluzy. Při vyšším napětí vznikají postupně deformace ve všech krystalech, které se natáčí a prodlužují ve směru vnějšího napětí, přičemž se jejich osy postupně orientují stejným směrem. Tvářením za studena tak vzniká vláknitá textura. U velmi silně taženého kovu jednotlivé krystaly už ani nelze rozeznat. Skluzové plochy mohou však také vzniknout, překročí-li se mez pružnosti kovu z jiných důvodů, zejména vnitřním pnutím.

Tvářením za studena se mění také některé vlastnosti fyzikální, i když ne tak výrazně jako vlastnosti pevnostní. Technicky nejvýznamnější je zmenšování elektrické vodivosti. Už slabým tvářením se zvětší odpor, který se nemění úměrně se stupněm tváření, ale dosahuje maximálních hodnot hned na počátku tváření. Zmenšení vodivosti je tak způsobeno buď změnou vrstvičky kovu po rozhraních krystalu nebo přítomností skluzových ploch[9]. Vliv tváření je u různých kovů odlišný. Např. odpor hliníku se téměř nemění.

Výsledek tváření je jen zřídka zcela rovnoměrný. Pouze při protahování válcové tyče v trhačím stroji lze předpokládat napětí v celém průřezu stejné, pokud se tyč místně nezaškrceje. Při válcování, tažení a podobném zpracování jsou části při povrchu vždy jinak tvářeny než vnitřní část průřezu. Nevyhnutelným následkem nestejně tvářených částí téhož průřezu je vnitřní pnutí mezi nimi, které může nabýt značných hodnot[9]. U kovu silněji tvářeného mohou být napětí tak veliká, že již malé vnější namáhání může vést k porušení. Vnitřní pnutí a následné prasknutí může způsobit i velký vliv koroze.

Velikost vnitřního pnutí závisí nejen na intenzitě tváření za studena, ale i na tloušťce výrobku. Čím větší je tloušťka, tím nestejněměrnější je výsledek tváření. Aby pnutí

nedosahovalo nebezpečně vysokých hodnot, tváří se za studena obvykle jen výrobky slabé[9].

Za studena je tedy možné tvářet kov jen do určité míry podle jeho houževnatosti. Když se vnitřní přetvárná práce vyčerpá, začne se kov v místech největšího napětí trhat[9] a další tváření je nemožné. Pokud požadujeme tváření intenzivnější než by kov snesl, musí se výrobek mezi tvářením ohřát. Tzv. rekrystalizačním žíháním se vliv tváření za studena zruší a kov je schopen dalšího zpracování.

Tváření za tepla

Tvářením za tepla rozumíme zpracování kovu za teplot nad jeho rekrystalizační teplotou. Tváření za tepla je kombinací tváření za studena a rekrystalizace. Při každém tváření za tepla vzniká tedy struktura odlišná od původní, která může být podle teploty a intenzity tváření jemnější nebo hrubší, než byla krystalizace původní. Tváří-li se intenzivně tak, aby se zpracování dokončilo při nízké teplotě, ale nad teplotou rekrystalizační, získáme jemnou strukturu a nejvýhodnější mechanické vlastnosti. Slabé tváření za vysokých teplot dává strukturu hrubou.

Tváření za tepla má v technické praxi značně větší význam než tváření za studena. Za tepla tváříme totiž kov z litého stavu, kdy je struktura hrubá a velmi nepravidelná, jež by se za studena jen s obtížemi dala zpracovat. Kromě toho vyžaduje tváření za tepla nepoměrně menší síly než za studena, a je proto jediným možným způsobem při zpracování velkých průřezů[9].

Všechny kovy nejsou za tepla stejně dobře tvárné. Nelze tedy předpokládat, že v celém rozsahu teplot, od teploty rekrystalizační až k teplotě tavicí, se dá každý kov dobře tvářet. U velmi houževnatých kovů tomu tak sice bývá, ale každý kov má určité rozmezí teplot, při nichž se tváří nejlépe. U některých kovů je tvárnost tak špatná, že se dají z litého stavu zpracovat pouze namáháním tlakem (lisováním, kování), protože by se při namáhání tahem roztrhaly. Pokud ale strukturu od lití náležitým propracováním rozrušíme, můžeme kov válcovat. Průměrně se počítá, že teprve po tváření o 75% původního průřezu se dosáhne dokonale rovnoměrné a jemné krystalizace a optimálních mechanických vlastností[9].

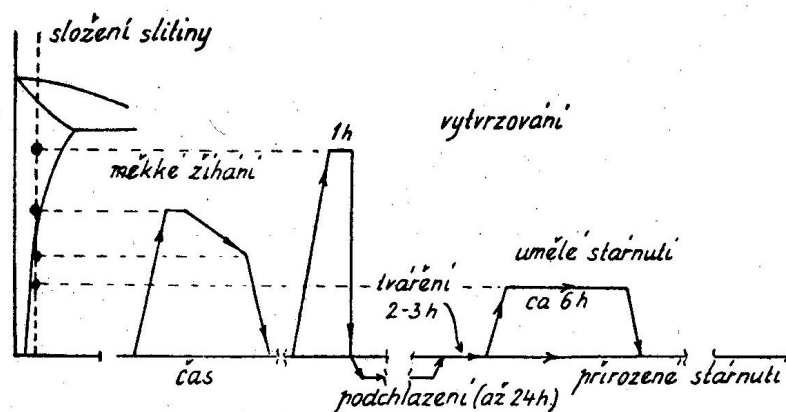
2.6 Tepelné zpracování

Lehké kovy se teprve tepelným zpracováním stávají konstrukčním materiálem takového významu, že pevností, dobrou zpracovatelností i opracovatelností mohou nahradit měkkou i středně pevnou ocel[10].

Tepelným zpracováním rozumíme ohřev na určitou teplotu, po němž následuje ochlazení určitou rychlostí. Takových pochodů může následovat i více za sebou. Tepelné zpracování nelze vždy oddělit od jiných technologických pochodů, neboť místo zvláštního ohřevu je v mnohých případech možno kov žhavy od slévání nebo od tváření za tepla rovnou ochlazovat určitou rychlostí, a tím dosáhnout žádaný účinek[9].

Hliník a jeho slitiny, běžně používané v technické praxi, nejsou polymorfní. To zmenšuje do určité míry možnosti tepelného zpracování na rozdíl od železa, kde následkem fázových přeměn je rozmanitost způsobů tepelného zpracování mnohem větší. Mezi tepelným zpracováním hliníkových slitin určených pro tváření a slitin pro odlévání není zásadní rozdíl[5].

Účelem tepelného zpracování je buď získat strukturu blízcí se co nejvíce stavu stabilnímu, a nebo dosáhnout určitého nerovnovážného stavu, který se vyznačuje zvlášť výhodnými mechanickými nebo jinými vlastnostmi. V prvním případě získáváme žádaný výsledek ohřevem na určitou teplotu a následným pomalým rovnoměrným ochlazením, pak pochod označujeme žihání. V případě druhém se musí ochlazování zrychlit zakalením. U hliníkových slitin mluvíme, vedle žihání, o tzv. vytvrzování.



Obr. 2.6.1 – Zakreslení teplot tepelného zpracování (vytvrzování a žihání) v rovnovážném diagramu [10].

Při žíhání hliníkových slitin se snažíme odstranit všechna pnutí vzniklá zpracováním za studena a předcházejícím vytvrzením, ať nahodilým nebo záměrným, dostat materiál rovnoměrné krystalizace, stejnoměrného rozložení a velikosti nerozpuštěných částic. Žíhaná slitina má být v rovnovážném stavu a má mít největší tvárnost a měkkost[10]. Vzhledem k tomu, že hliník již při nízké teplotě velmi snadno rekrystalizuje, je žíhání hliníkových slitin převážně žíháním rekrystalizačním, tedy obdobným jako u měkké oceli, používá se však i žíhání k odstranění pnutí, žíhání difúzní (homogenizační) k vyrovnání složení a k rozpuštění segregátu.

Vytvrzování má zvýšit tvrdost a pevnost slitiny tím, že se precipitát vyloučí ve velmi jemné formě uvnitř zrn krystalů a působí jako zdroj poruchy deformace krystalových mřížek. Při kalení oceli nastane porucha uvnitř mřížky, přímo v krystalovém elementu přeměnou tuhého roztoku, austenitu, v martensit. Při vytvrzování hliníkových slitin se však zakalením udrží agregát v tuhém roztoku a teprve ohřevem nebo delším setrváním v místnosti se z přechlazeného roztoku vylučuje[10].

Žíhání

Účelem žíhání, jak už bylo uvedeno, je dosáhnout stavu, který se co nejvíce blíží rovnovážnému stavu soustavy. Výše teploty je různá a řídí se druhem a stavem slitiny před žíháním a samozřejmě požadavky na konečné vlastnosti slitiny[5]. Celkový rozsah teplot, které přicházejí v úvahu u slitin hliníku pro žíhání, je podstatně menší než u slitin železa. Proto je také třeba provádět žíhání v pecích s přesnou regulací teplot.

Důležitý je vliv vyšších teplot na krystalizaci kovu. Čisté kovové prvky ve stavu litém a pomalu ochlazeném se žíháním nemění. Maximálně se mohou krystaly následkem povrchového napětí při vysokých teplotách trochu zaoblit[9]. Jsou-li však v kovu vnitřní pnutí přesahující určitou mez, např. od lití do kokily, může nastat rekrystalizace. U slitin a méně čistých kovů se normálním ochlazením dosahuje rovnovážný stav jen zřídka. Pak lze při žíhání očekávat různé změny, např. vyrovnání nestejnoměrnosti složení uvnitř krystalů tuhých roztoků[9].

Pokud kov obsahuje fáze rozpustné za vyšších teplot, může dojít dostatečně dlouhým ohřevem k jejich částečnému nebo úplnému rozpuštění. Ochlazujeme-li pak pomalu, vyloučí se taková fáze mnohdy v jiné podobě než původně[9]. Dostatečně rychlým ochlazením je možné vyloučení zamezit úplně a změnit tím vlastnosti kovu. Prodělává-li kov při ohřevu překrystalizace následkem vzniku nových fází při vyšších teplotách, tedy též alotropických změn, změní se zcela jeho struktura[9]. Podle rychlosti přechodu přes krystalizační teploty lze dosáhnout různé struktury; při přechodu rychlém dostaneme velmi jemnou krystalizaci, při přechodu velmi pomalém až extrémně hrubou.

Žiháme jak odlitky, tak i výrobky tvářené za rozmanitým účelem. Žihání hliníkových slitin se provádí nejčastěji jako operace při tažení polotovarů a hotových výrobků nebo k odstranění vytvrzení, dělají-li se na vytvrzených výrobcích opravy ohýbáním nebo lisováním[10].

Pro slitiny hliníku jsou důležité tyto způsoby rovnovážného tepelného zpracování:

- žihání na odstranění vnitřního pnutí,
- žihání homogenizační,
- žihání na rovnovážný stav,
- žihání rekrystalizační,
- měkké žihání,
- rozpouštěcí žihání.

Způsob zpracování různých výrobků určuje do jisté míry vznik vnitřního pnutí. U výrobků a výlisků tvarově komplikovaných a tvářených za tepla vzniká vnitřní pnutí způsobené nestejným zpracováním a ochlazováním různých jejich částí. Pnutí je tím větší, čím nestejnější jsou tloušťky stěn výrobku a čím rychleji chladnul. Všechna tato pnutí lze odstranit mírným ohřevem po tak dlouhou dobu, až celý výrobek nabude dokonale žádané teploty. Následuje pokud možno pomalé a rovnoměrné ochlazování. Krystalizace se takovým vyhřátím vůbec nemění, takže chemická nehomogenita ani nerovnoměrně vyvinuté zrna se žiháním tohoto druhu neodstraní[5].

Slitiny, které jsou chemicky heterogenní, a tudíž v nerovnovážném stavu, lze homogenizovat žiháním nad teplotou změny rozpustnosti, tedy v oblasti tuhého roztoku.

Délka doby žíhání závisí především na druhu slitiny a jejím stavu. Slitiny s velkou koncentrací přísad vyžadují delší prodlevu na teplotě a naopak. Slitiny tvářené a jemnozrnné jsou obvykle převedeny do homogenního stavu za mnohem kratší dobu než slitiny slévárenské, které mají většinou hrubozrnnou strukturu po odlití[5]. Obvykle při žíhání hrubne zrna, čímž se zhorší některé mechanické vlastnosti. Je proto žádoucí, aby se délka doby žíhání zbytečně neprodložovala.

Homogenizační žíhání je zakončeno různě. Volně ochlazované slitiny jsou v rovnovážném stavu bez vnitřního pnutí. V některých případech, zejména u některých hliníkových slitin a také u hliníku Al 99,5, je možné ochlazovat rychleji, aby naopak k rovnovážnému stavu nedošlo a byl zachován homogenní tuhý roztok, který je v tomto případě přesycen. Nečistoty, které hliník v malé míře provázejí, zůstávají v tuhém roztoku, čímž se zlepši vzhled a zvýší se odolnost proti korozi.

Po vytvrzení je uvnitř krystalů vyloučena složka působící vytvrzení. Následkem deformace krystalové mřížky se zvýší tvrdost, což má za následek, že precipitát brzdí i posuv krystalů, a tím schopnost tváření za studena[10]. Má-li se vyžíhat vytvrzená slitina, musí teplota žíhání vystoupit nad křivku rozpustnosti (obr.2.6.4), aby se segregát rozpustil. Ochlazení ale musí být dostatečně pomalé, aby segregát vykrytalizoval znovu, ovšem mezi zrny, kde se jeho vliv uplatňuje nejméně[10]. Proto je v takovém případě při žíhání nutné teploty zvýšit.

Určité nepravidelnosti při rozložení vyloučených součástí mohou nastat již při lití. V takovém případě lze difúzním žíháním obnovit stejnorodost struktury a získat příznivější vyloučení segregátu. Difúzní žíhání se děje při nejvyšší možné teplotě, pokud nenastane vycezení tím, že se nejnižší tající součásti slitiny začnou tavit[10]. Proto se žíhání hliníkových slitin řídí podobně jako u oceli podle toho, jakého účinku potřebujeme dosáhnout.

Žíhání na rovnovážný stav se uplatňuje u slitin, které byly vytvrzeny a které je nutno vyžíhat, aby bylo dosaženo plně rovnovážného stavu. Teplota žíhání se obvykle volí v rozsahu 300 až 400°C, potom následuje volné ochlazování v peci na teplotu nejméně 200°C a poté rychlejší ochlazení na vzduchu. Žíhání tohoto druhu se používá jak pro tvářené hliníkové slitiny, tak i pro slitiny odlévané.

Při tváření tlakem za studena dochází k posuvu podle skluzových ploch uvnitř krystalů, a tím k deformaci krystalů hliníku, který krystalizuje v krychlové soustavě a tvoří atomové elementy plošně centrované[10]. Deformací při tažení se krystaly protahují a ztrácejí schopnost dalšího posouvání, což se projevuje vzrůstající tvrdostí. Ohříváním na určitou teplotu, teplotu rekrystalizační, se začnou krystaly zotavovat, protažený krystal se rozpadne v několik krystalů menších, které dostávají původní tvar (zaoblují se). Tím se v krystalech obnoví schopnost kluzu a tvrdost získaná při tažení se zmenšuje, kov opět jeví pravidelné zrnno a zjemňuje se [10]. Ještě dříve, než teplota stoupne na teplotu potřebnou k rekrystalizaci, odstraňuje se pnutí, takže rekrystalizovaný vyžíhaný kov je rozměrově a tvarově ustálen.

Při rekrystalizačním ohřevu za studena tvářeného kovu se tedy odehrávají tři důležité děje:

- zotavování,
- rekrystalizace,
- růst krystalů.

Zotavování je v podstatě žíhání na odstranění vnitřního pnutí. Tvářením za studena se zvětšuje počet dislokací. Mírným ohřevem, který způsobí alespoň částečné odstranění poruch, se snižuje počet dislokací ještě dřív, než nastane rekrystalizace. Zmenšení atomárních pnutí je spojeno se zvětšením elektrické vodivosti a chemické odolnosti, současně se zmenšuje náchylnost k praskání vlivem koroze a praskání pnutí.

Zvyšuje-li se teplota žíhání nad teplotu rekrystalizační, dostavuje se další fáze, rekrystalizace. Rekrystalizační teplota u hliníku začíná již při 150 až 200°C, ale mění se podle stupně tváření a podle druhu a množství přísad. V místech maximálního energetického obsahu se začnou tvořit krystalová jádra[9], zárodky, z nichž rostou krystaly nové a nahrazují tak původní krystaly deformované. Rekrystalizace je doprovázena změnou všech pevnostních vlastností, a tím se stává dějem technicky velmi důležitým. Počátek rekrystalizace je současný s počátkem poklesu pevnosti. Při pomalém průběhu, za nižších teplot, pokračuje pokles až po dosažení minimální pevnosti[9]. Mez pružnosti se na počátku ještě poněkud zvyšuje a tažnost zůstává nezměněna[9]. Pokles meze pružnosti je celkově pomalejší než pokles pevnosti.

Ohřev na vyšší teploty nebo i dlouhodobý ohřev na teploty nízké tedy způsobuje ztrátu zpevnění získaného tvářením, a také ostatní vlastnosti nabývají hodnot, jaké měly před tvářením. Rychlost, s níž tyto změny probíhají, je závislá na teplotě a době ohřevu, a také na velikosti předchozího zpevnění[9].

U každého kovu rekrytalizovaného nebo schopného rekrytalizace hrubne struktura ohřevem na vysokou teplotu, blízkou teplotě tavicí, tím způsobem, že se jednotlivé jeho krystaly postupně zvětšují a stravují krystaly menší[9]. To znamená, že jednotlivé krystaly vzrůstají na úkor jiných a celková krystalizace hrubne. Podobně působí i prodlužování doby žihání. Hrubnutí zrna, ať již po slabém tvářením nebo následkem příliš vysokého či dlouhodobého ohřevu, není u každého kovu stejné. Zhrubnutí je provázeno zmenšením pevnosti a tvrdosti a označuje se obvykle jako přehřátí kovu[9]. Přehřát je možno zejména každý kov tvářený, ať již byl tvářen za tepla nebo za studena, předem vyžhán či nikoli[9]. Zjemnění struktury a náprava přehřátého kovu je možná novým vyžháním jen u kovů prodávajících změnu fází[9]. Kov musí být žhán nad teploty přeměny a přechod přes tyto teploty, jak za ohřevu, tak i za ochlazování, musí proběhnout dostatečně rychle. Žhání lze podle potřeby i vícekrát opakovat.

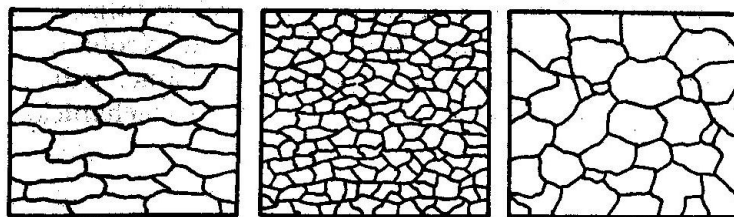
Mezi zotavováním a rekrytalizací není ostré rozhraní. Při vyšších teplotách se dostavuje rekrytalizace spontánně, proces zotavování nelze ani postřehnout[9]. Čím nižší je teplota, tím lépe je možné oba děje sledovat, zejména u kovů výše tajících. Rekrytalizaci při nízkých teplotách předchází takové zotavování, kterým se odbourávají maxima poruch, a tím se ztěžuje tvoření jader nových krystalů[9]. Rekrytalizace se zpožďuje a může se stát, že vůbec nenastane, a pevnostní vlastnosti se znenáhla mění bez viditelné změny struktury vzniklé tvářením[9].

Velikost zrna získaného rekrytalizací je vedle zmíněné teploty a doby ohřevu závislá také na stupni předchozího tvářením, jemnosti původního zrna a na čistotě kovu. Závislost na velikosti zpevnění předchozím tvářením je velmi značná. Pokud kov nebyl tvářen, není schopen rekrytalizace, leda by měl dost velké nehomogenní vnitřní pnutí jiného druhu[9]. Teplota rekrytalizační je u takového kovu teplotou tavicí. Po zcela slabém tvářením rychle klesá, kdežto po tvářením intenzivním se již téměř nemění.

Při rekrytalizaci se spotřebuje potenciální energie, jež se tvářením za studena v kovu nahromadila. Zárodky nových krystalů vznikají právě v místech největšího

nahromadění energie, a tím je dáno, že se netvoří najednou, ale postupně[9]. Vyrůstající z nich krystaly mají mřížky stabilnější, než jsou mřížky krystalů tvářením porušených, a proto rostou na úkor posledních, až je zcela stráví[9]. Čím jemnější byla původní krystalizace, tím spíše se při nižších teplotách počnou tvořit krystaly nové. Monokrystaly mají při stejném tvářením rekrystalizační teplotu vyšší než polykrystalický kov. Také je rekrystalizační teplota tím vyšší, čím bylo tvářením stejnoměrnější, zřejmě z toho důvodu, že je potenciální energie stejnoměrněji rozdělena a maxima jsou při určitém stupni tvářením menší[9]. Proto je po obvyklých technických pochodech válcování, tažení, lisování apod. nižší rekrystalizační teplota než po protažení tyče v trhačím stroji[9].

Při rekrystalizaci je analogicky jako při krystalizaci z tekutého kovu jemnost vznikajícího zrna závislá na počtu tvořících se jader a na lineární rychlosti růstu krystalů. Čím slabší bylo tvářením, tím menší jsou maxima poruch a je také menší jejich počet, takže se jádra počnou tvořit až při vyšších teplotách[9]. S rostoucí teplotou se zvětšuje rychlost růstu krystalů, a tím je dáno, že vzniká po slabém tvářením krystalizace hrubá. Naopak při tvářením silném vzniká již při nižších teplotách značný počet jader, a tím jemná rekrystalizační struktura. Může se však stát, že žíháním silně zpevněného kovu na velmi nízké teploty, jež vyžaduje dlouhé doby, se zotavováním poruchy tak dalece zmenší, že vzniká jader málo a krystalizace je hrubá. Podobně je tomu i při ohřevu velmi pomalém[9].



Obr. 2.6.2 – Průběh rekrystalizace. Vlevo původní deformované krystaly, uprostřed skončená rekrystalizace a vpravo růst zrna [10].

Přeměnou všech původních deformovaných krystalů nejsou ještě všechny reakce skončeny. Na vlastní rekrystalizace navazuje třetí děj, samotný růst krystalů, čímž

struktura postupně hrubne[9]. Růst je funkcí teploty a času a závisí také na předchozím tváření. Po slabém tváření vzniká hrubá rekrystalizační struktura, která je však málo náchylná k dalšímu hrubnutí růstem krystalů. Naopak jemná struktura, vznikající po zpevnění intenzivním, podléhá růstu mnohem víc. Volbou teploty a doby žíhání lze tedy dojít k velmi rozmanité velikosti krystalů a pracovat záměrně k dosažení optimální jemnosti krystalizace, vyžadované pro ten který účel[9].

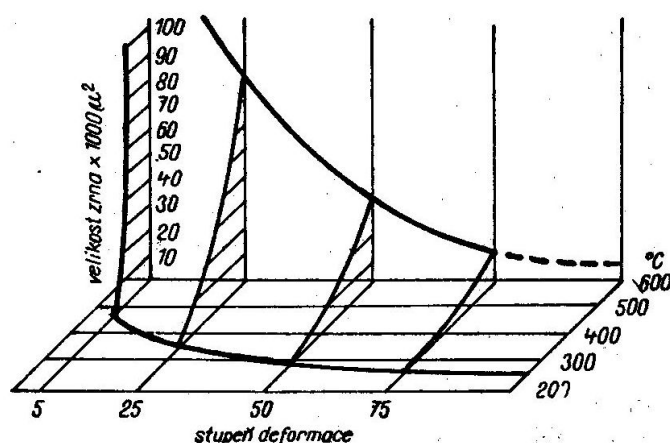
Na jemnost rekrystalizační struktury působí také heterogenní příměsi, zejména jsou-li velmi jemně dispergovány. Zamezují totiž volnému růstu krystalů. Heterogenně vyloučené příměsi snižují houževnatost každého kovu. V tvářených kovech mohou být vyloučeny segregací následkem zmenšení rozpustnosti za nižších teplot[9]. V takových případech se odstraní vyhřátím na teploty, při nichž je kov homogenní, a následným prudkým ochlazením, kterým se segregace potlačí. Tento pochod není vlastně již žíháním, neboť jeho účelem není dosažení vnitřní rovnováhy[9]. Ale i v jiných případech slouží prudké ochlazení k dosažení houževnatosti a tvárnosti slitiny.

Čím čistější je kov, tím snáze se vytvoří hrubá krystalizace. Rekrystalizační teploty jsou velmi závislé na čistotě kovu. Zvláště některé příměsi mohou již při nepatrném množství rekrystalizační teplotu zcela podstatně snížit nebo zvýšit. To je důležitým důvodem, že zpravidla žíháme kov značněji nad rekrystalizační teplotu, chceme-li spolehlivě dosáhnout rekrystalizace[9].

Krystalová orientace po rekrystalizaci může být zcela nepravidelná nebo může vykazovat rekrystalizační texturu zpravidla stejné nebo podobné orientace jako byla textura od tváření. Hexagonálně krystalizující kovy dávají vždy rekrystalizační texturu[9]. Ta má za následek, že mechanické vlastnosti jsou i ve vyhřátém stavu v různých směrech nestejně a závislé na směru předchozího tváření. Takovým nepravidelностям lze zabránit jedině odstraněním rekrystalizační textury. U některých technologií je možné omezit texturu už při tváření, např. válcováním střídavě do různých směrů. Pokud to nelze, doporučuje se odstranění textury použitím co nejvyšší teploty při posledním mezižíhání, poté následuje jen slabé tváření a konečné žíhání při teplotě co nejnižší. K rekrystalizační textuře je kov náchylný tím více, čím je čistší, a proto někdy stačí i užití méně čistého kovu, dovolí-li to jeho tvárnost[9].

Žihá-li se kov za obvyčejné teploty slabě tvářený, vzniká hrubá krystalizace, a to tím hrubší, čím slabší bylo tváření. Další zpracování za studena takto hrubě krystalizovaného kovu způsobí zhrubnutí až zkrabacení jeho povrchu, vzniklé natáčením jednotlivých krystalů z původní roviny[9]. Vzhled tím velmi trpí a případně se výrobek stává nepoužitelným. Takovému zpracování je proto nutné se vyhnout.

Měkké žihání, které se provádí po zpracování slitin za studena, probíhá při teplotě ohřevu 340 až 450°C. Pouze slitina hliníku s 1% manganu, která se používá tam, kde je žádoucí lepší pevnost, než jakou má čistý hliník, ale bez velké újmy na tvárnosti, vyžaduje ohřev 400°C [10]. Při měkkém žihání by měla nastat rekrytalizace, a tím obnovení žádoucí tvárnosti. Nesmí však pokročit příliš daleko, aby nenastalo zhrubnutí, jež se při lisování projevuje vrásčitým hrubým povrchem[10]. Zhrubnutí může nastat také při malé předcházející deformaci. Je-li stupeň deformace dostatečný a předem známý, není třeba při dodržení uvedených teplot obávat se zhrubnutí (obr.2.6.3).



Obr. 2.6.3 – Rekrytalizační diagram hliníku [10].

Rychlost ohřevu není podstatně důležitá, pouze u manganové slitiny dbáme na rychlý ohřev[10]. Překročení teploty nemůže mít škodlivé následky, ale vyhýbáme se tomu vzhledem k růstu zrna a k povrchové oxidaci, zvláště u slitin obsahujících hořčík, u kterých se tvoří příliš tlustá vrstva oxidu[10]. U slitin, které se nevytvrzují, může být ochlazení rychlé, na vzduchu.

U slitin vytvrzujících se provádí měkké žíhání odlišným způsobem. Postup popsany výše je vhodný jen tehdy, nezáleží-li na největší měkkosti nebo nežihá-li se slitina vytvrzená[10]. V opačném případě se teplota žíhání zvyšuje na 400 až 430°C a následné ochlazování je velmi pomalé, přibližně 30°C za hodinu, až na teplotu 250°C, další ochlazování může být již na vzduchu[10].

Ohřev na žíhací teplotu by měl být rychlý, především u plátovaných slitin, kde je nebezpečí pronikání mědi do plátované vrstvy z čistého hliníku, což má za následek snížení odolnosti proti korozi[10].

Volba teploty žíhání se řídí podle povahy slitin. U slitin zpevněných zpracováním za studena musí být teplota dostatečně vysoká, aby nastala rekrytalizace, ale ještě tak nízká, aby se segregát nerozpouštěl, protože by po ochlazení slitina vytvrzovala[10].

U slitin, které vytvrzují jen po umělém stárnutí, je výhodnější místo měkkého žíhání provést úplný ohřev k rozpuštění segregátu a rychle ochladit, tedy postup předcházející vytvrzení, protože se tak slitina stane dostatečně tvárnou a lze ji po lisování nebo ohýbání vytvrdit[10].

Pro žíhání hliníkových slitin se může použít všech druhů pecí, pokud v nich lze účelně dodržet nízkou teplotu žíhání v celém prostoru pece s dostatečnou stejnoměrností. Jsou k tomu vhodné pece komorové, pece šachtové i průtažné (kontinuální). První druh je vhodný pro plechy, tyče, trubky, svítky pásků, velké výkovky a odlitky, druhý pro drobné odlitky, výkovky, výlisky a třetí pro pásy a dráty[10]. Při vhodném uspořádání však lze použít kteroukoli z nich. V komorových pecích se mohou žíhat i drobné předměty, pokud jsou umístěny na pohyblivých stojanech s drátěnými liskami. Pece jsou nejčastěji vytápěny elektřinou, ale ani vytápění plynem není výjimkou.

Proces žíhání ovlivňuje mnoho faktorů. Proto dochází k určitým chybám, které zapříčiní odchylky v požadovaných vlastnostech materiálu. Příliš tvrdý nebo málo tažný materiál po žíhání je vinou nedostatečné žíhací teploty. Je-li tvrdý, ale přitom ještě dostatečně tažný, může to být zaviněno i překročením teploty nebo rychlým ochlazením[10]. Špatná zpracovatelnost při tažení může být často, zvláště u slitin vytvrzujících, následkem jemně vyloučeného segregátu po vysokém žíhání a rychlém

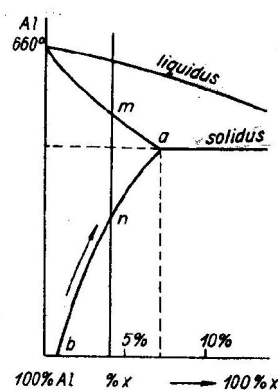
ochlazení. Nepěkné zbarvení, skvrny apod. jsou často způsobeny nedostatečným odmaštěním, celkové ztemnění povrchu bývá následkem vysokého ohřevu a vyskytuje se často u některých slitin[10]. Hrubé zrno je způsobeno růstem po nedostatečném úběru při zpracování za studena.

Vytvrzování slitin typu Al-Mg-Si

Zatímco se žihání provádí u čistého hliníku a u všech ostatních slitin podle potřeby, hodí se k vytvrzování pouze určité hliníkové slitiny, jejichž složení je přizpůsobeno vytvrzování přidavkem a kombinací určitých přísad. Jako přísadové prvky, jež dávají hliníku schopnost vytvrzování, můžeme jmenovat měď, nikl, kobalt, hořčík, křemík, zinek a mangan[10].

Prodělává-li slitina po skončeném ztuhnutí jakékoli krystalizační změny, je ve většině případů možno rychlým ochlazením změny více nebo méně dokonale potlačit, a tím změnit vlastnosti slitiny[9]. V technické praxi se používají hlavně dva pochody tohoto druhu, vytvrzování a zušlechťování. Mluvíme tedy o tepelném zpracování s nerovnovážnými stavy.

Tohoto způsobu zlepšování pevnosti lehkých i jiných kovových slitin se používá tehdy, jestliže jsou k tomu vhodné předpoklady metalografické, má-li totiž slitina v rovnovážném diagramu v tuhém stavu křivku rozpustnosti podobnou diagramu[10] na obr. 2.6.4. Druhým předpokladem je pak to, aby se součást, která se rozpouští, dala zadržet v tuhém roztoku přechlazením[10].



Obr. 2.6.4 – Schematicky naznačená část rovnovážného diagramu hliníkové slitiny s libovolným kovem působícím vytvrzení [10].

Vytvrzování hliníkových slitin jako celkový technologický postup můžeme proto dělit do dvou operací tepelného zpracování:

- rozpouštěcí žíhání s velmi rychlým ochlazením (zakalením),
- vlastní vytvrzení (stárnutí).

V některých případech však není nutné provádět obě operace. Např. u odlitků, zvláště kokilových, chladnutí nahradí první operaci a provádí se pak pouze stárnutí. Velmi často se kombinují operace tepelného zpracování s tvářením za studena. Necháme-li materiál stárnout až po zpevnění za studena, dosáhneme ještě lepších mechanických hodnot. Někdy se první operace provádí u výrobce polotovaru v huti a stárnutí, které vyžaduje jednodušší zařízení, až po zpracování u spotřebitele. Pro tento způsob jsou ale vhodné jen některé slitiny.

Rozpouštěcí žíhání je prováděno jako přípravná operace před následujícím ochlazením. Při rozpouštěcím žíhání v oblasti homogenního tuhého roztoku se dokonale rozpouštějí ty fáze, které jsou za dané teploty v tuhém roztoku rozpustné. Slitina, která v rovnovážném stavu za normální teploty byla heterogenní, stává se během rozpouštěcího žíhání homogenní[5].

Oblast pro ohřev je úzce ohraničena. Spodní teplota musí být ještě tak vysoká, aby se spolehlivě segregát rozpustil, horní teplota však nesmí překročit likvidus, aby nevznikly vycezeniny[10]. Při volbě teploty je nutno přihlížet i k mechanickým vlastnostem slitiny, zda při teplotě ohřevu je ještě slitina dostatečně únosná, aby vydržela dobu ohřevu bez deformací. Při vkládání do pece je nutno na tuto okolnost dobře pamatovat a složité součásti vhodně zavěsit, vyztužovat nebo podepřít[10]. Podle druhu slitiny se pohybuje teplota ohřevu mezi 440 až 525°C. Předepsaná teplota se však musí dodržet s přesností alespoň $\pm 5^\circ\text{C}$. Výchylka směrem k vyšším teplotám znamená úplné znehodnocení slitiny, protože dochází k tavení na hranicích zrn a zrno tak prudce hrubne[5]. Výchylka směrem k nižším teplotám způsobuje, že rozpouštění segregátů není dokonalé a očekávané zlepšení mechanických vlastností se nedostaví[5].

Doba ohřevu závisí značně na jemnosti zrna. Jemně vyloučené fáze se ve tvářených slitinách rozpouštějí podstatně rychleji než tytéž fáze vyloučené v hrubých útvarech v odlitcích[5]. Proto odlitky vyžadují všeobecně delší dobu ohřevu než výkovky a výrobky

z tvářených slitin. Obvykle je snahou zkrátit dobu žihání na nejmenší možnou míru, protože zbytečným prodlužováním ohřevu hrubne krystalická struktura a zhoršují se mechanické vlastnosti. Délka doby žihání závisí také na předchozím tepelném zpracování slitiny, zejména pokud již byla vytvrzena nebo homogenizačně žihána[5]. U slitin, které byly před rozpouštěcím žiháním tvářeny za studena, probíhá při rozpouštěcím ohřevu rekrytalizace. Rovnoměrnost a velikost zrna po rekrytalizaci záleží na rychlosti žihání, proto je výhodné provádět rekrytalizační žihání takto zpracovávaných slitin v solných lázních[5].

Ochlazení slitiny, které následuje po skončení rozpouštěcího žihání, se řídí mnoha požadavky; přihlíží se k odolnosti slitiny proti pnutí při ochlazení, k dosažení nejlepší pevnosti, k dosažení velké odolnosti proti korozi apod.

Účelem ochlazování je získat přesycený tuhý roztok za normální teploty a zabránit segregaci fází, které tuhý roztok přesycují[5]. Pokud je slitina ochlazována menší rychlostí nebo není-li slitina po vyjmutí z pece ochlazena ihned, může dojít částečně k segregaci na hranicích zrn. Segregované fáze vyvolávají chemickou heterogenitu a slitina má menší odolnost proti korozi, nižší pevnost i tažnost[5]. Chemické přesycení je určeno rozdílem obsahu legujícího prvku, který se po ochlazení v tuhém roztoku udržel, a obsahem, který určuje hranici rozpustnosti při dané teplotě (obr. 2.6.4), obvykle při 20°C [3].

Stupeň přesycení tuhého roztoku závisí na složení a typu slitiny, ale především na rychlosti ochlazování. Jednotlivé slitiny se liší zejména stabilitou tuhého roztoku a pohyblivostí legujících atomů[3].

U slitin hliníku se ochlazení obvykle provádí do vody o teplotě 20°C. Kalení ve studené vodě se předepisuje u polotovarů, které se budou rovnat a upravovat, a tam, kde se požaduje velká odolnost proti korozi[10]. Tvarově komplikované výrobky, u nichž mohou vznikat deformace vlivem tepelných pnutí po rychlém ochlazení, se kalí v horké vodě 70 až 90°C. Někdy se může použít jako mírnějšího prostředku i vodní mlhy, velmi jemné sprchy, aby se zabránilo velkým deformacím, ale ne u slitin se sklonem ke korozi. Na vzduchu se ochlazují slitiny s vysokou stabilitou přesyceného tuhého roztoku[5].

Interval mezi vyjmutím z ohřívací pece a ponořením musí být co nejkratší. Tomuto požadavku se u některých slitin podřizuje i konstrukce pecí a kalicích van.

Na rozdíl od heterogenního stavu se homogenní stav za normální teploty vyznačuje nižšími pevnostními vlastnostmi, vyšší tažností i houževnatostí. Zakalená slitina je měkká a dobře tvárná.

Po vychladnutí a usušení, popř. odmaštění, mohou následovat úpravy za studena, buď tažení, nebo lehké přerovnání, u tvarových výlisků překalibrování nebo dokončovací operace, které se pro zpevnění tažením nebo se zřetelem na deformace úmyslně neprovedly před ohřevem[10].

Podle chování po zakalení rozlišujeme dva druhy slitin:

- slitiny přirozeně stárnoucí,
- slitiny uměle stárnoucí.

Stárnutí je vlastním dokončením vytvrzování. Při stárnutí materiálu, tzv. precipitaci, dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku na nepřesycené tuhé roztoky a precipitát. Velmi často je precipitace víceetapňová.

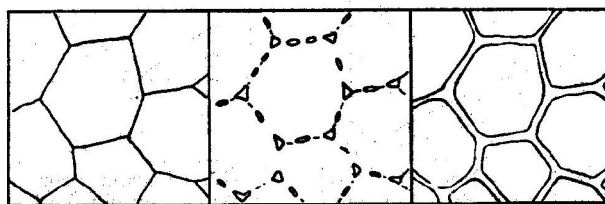
U slitin přirozeně stárnoucích dojde již za krátkou dobu po zakalení k vylučování segregátu, slitina začíná v místnosti tvrdnout. Vytvrzování je ukončeno po 3 až 5 dnech. Lze ho urychlit mírným ohřevem, ale neprovádí se to proto, že hrubším vyloučením segregátu se snižuje odolnost proti korozi. Teplota i doba stárnutí bývá u každé slitiny předepsána. Má-li se dosáhnout vždy stejných a předepsaných výsledků, je nutno dodržet ji s přesností asi $\pm 2,5^\circ\text{C}$. Stárnutí trvá obvykle 6 až 24 hodin. Čím vyšší je teplota, tím postačí kratší doba[10]. Jestliže se doba stárnutí podstatně překročí, má to za následek hrubší sbalení segregátu, a tím snížení očekávané pevnosti. Stejný následek má i překročení teploty (tzv. přetvrzení).

Mírný ohřev při stárnutí (popouštění) má za následek větší pohyblivost atomů a usnadňuje vyloučení precipitátu. Čím je teplota popouštění vyšší, tím snáze se precipitát shlukuje ve větší částice, mírní se jeho rušivý vliv, slitina měkne, až při žíhací teplotě nabývá největší měkkosti[10]. Zvýší se pevnost a tvrdost materiálu, ale sníží se houževnatost, tzv. vystárnutá slitina není vhodná k dalšímu tváření. Pro technické

vlastnosti slitiny lze najít takovou teplotu, při níž nastane optimální vyloučení. Tím dostaneme slitinu s nejlepší pevností, mezí pružnosti, houževnatostí a tažností. Při provádění procesu je nutno velmi přesně dodržet tuto teplotu a zároveň i dobu, po kterou se ohřívá[10]. Je výhodné použít k vytvrzení slitiny s vysokým obsahem příměsí, které umožní větší přesycení tuhého roztoku a pevnost materiálu bude ve výsledku ještě vyšší.

Proces segregace, nebo-li vylučování nerozpustné složky ve formě nové fáze, je dějem, který lze popsat na rovnovážném diagramu (obr.2.6.4).

Při chladnutí slitiny, která tuhne podle rovnovážného diagramu se změnou struktury v tuhém stavu následkem snížení rozpustnosti druhé složky, se při poklesu teploty na křivku likvidu začíná vylučovat tuhý roztok proměnlivého složení. Teprve až na křivce likvidu všechna slitina ztuhne jako tuhý roztok s určitým procentem přísady. Po dalším pomalém chladnutí dospějeme k segregací křivce. To je okamžik, kdy se v rovnovážné soustavě začne vylučovat nová strukturní složka, a to nejprve mezi zrna a pak na povrchu zrn (obr.2.6.5). Nazýváme tuto součást segregát nebo též precipitát[10]. V literatuře se setkáváme někdy s rozlišováním obou pojmů. Jako segregát se míní hrubší vyloučené fáze, zvláště na okraji zrn a za vyšších teplot, jako precipitát submikroskopické fáze vyloučené při stárnutí za nižších teplot, zpravidla uvnitř zrn[10]. Předpokladem pro to, aby se precipitát vylučoval i uvnitř zrn nebo zrna prorůstal, je velké množství segregátu a deformace zrn vnitřním nebo vnějším napětím[10].



Obr. 2.6.5 – Segregace nové fáze na povrchu zrn. Vlevo původní tuhý roztok, uprostřed počátek segregace, vpravo vznik souvislého povlaku [10].

Při poklesu na teplotu místnosti zůstane v tuhém roztoku jen asi 1% kovu a zbytek je vyloučen jako segregát[10]. Popsaný děj je rovnovážný a slitina má největší měkkost, jaká jí přísluší[10].

Jestliže však poklesne teplota velkou rychlostí, nenastane rovnovážný stav, ale příměsi zůstanou v tuhém roztoku přechlazeně rozpuštěny[10]. Slitina má ovšem sklon k zaujetí rovnovážného stavu. Proto podle druhu slitiny nastává vylučování segregátu i po ochlazení a s rostoucím časem vylučování stoupá. Za normální teploty je ale pohyblivost atomů tak malá, že atomy kovu nemohou prostoupit krystalovou mřížkou k okraji zrn a vyloučit se jako segregát, a proto vyloučení nastane v nesmírně jemném rozptýlení uvnitř zrn, takže pak jde spíše o precipitát[10]. Obvykle je precipitát tak jemný, že jej nelze zjistit ani mikroskopicky, ale lze ho předpokládat podle poruchy atomové mřížky při rentgenografickém zkoumání. Dalším projevem vyloučení je také zvýšení tvrdosti a pevnosti.

Dlouhou dobu vylučování můžeme zkrátit ohřevem, naopak zabrzdit ho můžeme podchlazením na bod mrazu nebo i pod něj[10]. Podle druhu slitiny se můžeme setkat s menším nebo větším sklonem k vylučování, existují i takové slitiny, které za normální teploty vyloučit precipitát nejsou vůbec schopny.

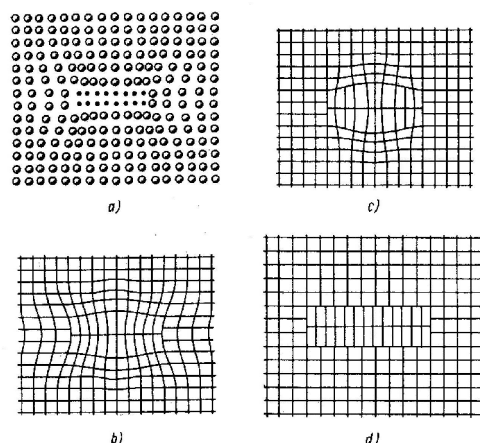
Precipitace, jako zvláštní případ segregace uvnitř krystalů, obecně probíhá ve třech fázích. V přesyceném tuhém roztoku, který vznikne ochlazením materiálu, je koncentrace příměsí v celém objemu stejná. V první fázi precipitace, tzv. předprecipitačním stádiu, se ale příměsi začínají hromadit v určitých místech, čímž vznikají oblasti s vyšší koncentrací příměsí. Toto stádium difúzního pohybu atomů příměsí je spojeno s rozsáhlým pohybem vakancí, intersticií a dislokací a jejich soustřeďováním v určitých krystalografických směrech a rovinách[5]. V místech koncentračních rozdílů, tzv. Guinier–Prestonových zónách (obr.2.6.6), vzniká velké vnitřní pnutí a probíhá zde nukleace nové fáze, která je bohatší na přísadu než základní tuhý roztok. Tím se zvýší pevnost, ale houževnatost materiálu je zatím stejná.

V dalším stádiu se v Guinier-Prestonových zónách začínají růstem zárodků vytvářet tzv. koherentní precipitáty a zóny rostou (obr.2.6.6a). Jsou to částice, v nichž se shromažďuje převážná část nadbytečných legujících atomů z přesyceného roztoku[3]. K

jejich vzniku je potřeba dostatek energie, dochází totiž ke změně mřížky a vzniká rozhraní, tedy tvar povrchu precipitátu. Precipitát tedy potřebuje energii na vytvoření částic, a to energii elastickou a povrchovou. Převažuje-li povrchová energie, snaží se částice vytvořit tvar s co nejmenším povrchem, tj. tvar kuliček. Převažuje-li však energie elastická, vzniká precipitát ve tvaru destiček. Pokud jsou poměry obou energií stejné, vznikají precipitáty tvaru tyčinek a jehliček. V okolí Guinier-Prestonových zón opět vzniká napětí. Napěťové pole kolem každé částice brzdí pohyb dislokací. Čím jemnější jsou částice a čím menší je jejich vzdálenost, tím je vliv větší. Zpevňování, vyvolané přítomností disperzních částic, lze vyjádřit zvýšením odporu proti pohybu dislokací[3]. Částička druhé fáze může působit jako nepropustná a dislokace ji musí obejít nebo ji dislokace protne. K obcházení překážek dochází tzv. Orowanovým mechanismem.

Za mírně zvýšené teploty se koherentní precipitáty dále rozrůstají a jejich počet se zmenšuje. Atomy příměsí se v Guinier-Prestonových zónách (obr.2.6.6b) soustřeďují do rovin rovnoběžných se stěnami kubické mřížky základního kovu a tvoří tak periodické uspořádání atomových vrstev. Jestliže se precipitát posune o více než polovinu parametru mřížky, vzniká dislokace a dochází ke ztrátě koherence, čímž poklesne pevnost materiálu. Vznikají tak částečně koherentní precipitáty (obr.2.6.6c), tzv. přechodové, díky kterým může dojít znovu ke zpevnění materiálu. Tyto precipitáty mají tetragonální mřížku a jejich vznik urychluje teplota.

Při vyšších teplotách a dlouhé době se ale přechodový precipitát zcela přemění na stabilní precipitát (obr.2.6.6d). Takový precipitát má tetragonální mřížku s velkými rozdíly oproti základní mřížce, je tedy zcela nekoherentní a má typické vlastnosti intermediální fáze[3]. Vznikají už jen nekoherentní rovnovážné fáze a vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti se zmenšuje. Jakmile se zvýší objem této fáze a zmenší se její disperzita, projeví se úplné porušení koherentnosti snížením pevnosti a tvrdosti na minimální výši, při čemž se současně zvyšuje tažnost a houževnatost slitiny. Slitina je tzv. přestárnutá. Poslední stádium precipitačního vytvrzování, charakterizované vznikem stabilních nekoherentních rovnovážných precipitátů, označujeme jako disperzní vytvrzování[3].



Obr. 2.6.6 – Schematické znázornění vzniku Guinier-Prestonových zón a jejich změn při precipitaci [3].

Pro dosažení požadovaných hodnot mechanických vlastností je potřeba, aby precipitáty vznikly rovnoměrně v celém objemu materiálu a nikoli lokálně. K tomu je nutné ponechat dostatek času pro vznik Guinier-Prestonových zón.

Největší pevnost získává materiál růstem zón do takové velikosti, až se oblasti jimi deformované vzájemně překrývají[8]. Při teplotách nad 200°C vzniká ve slitině typu Al-Mg-Si rovnovážný koherentní precipitát, jehož zpevňující účinek je podstatně menší. Intenzitu tvorby zón, a tím i zpevnění materiálu, silně ovlivňuje chemické složení. Důležitou legurou je zde hořčík, který již v malých obsazích (0,02%) uděluje materiálu schopnost vytvrzení při pokojové teplotě, a až do obsahu 1,5% zvyšuje dosažitelnou pevnost[8]. Železo přítomné ve slitině způsobuje snížení výsledných pevnostních hodnot tím, že tvoří s mědí fázi, která ochuzuje tuhý roztok o část mědi, která se pak nezúčastňuje vytvrzování. Negativní vliv železa eliminuje přítomnost křemíku, který na sebe váže železo, které se tak neslučuje s mědí, a tím se tuhý roztok o měď neochuzuje. Mimo základních legur obsahuje slitina většinou ještě mangan, jehož vliv na vlastnosti materiálu je zcela specifický, ale který průběh vytvrzování v podstatě neovlivňuje[8].

Dodržování předepsaných teplot je základem tepelného zpracování hliníkových slitin. Většina závad a nezdarů je způsobena nevhodnými pecemi, nepřesně pracujícími teploměry a regulátory a chybnou pracovní technikou[10]. Nedostatečný ohřev, přehřátí, pomalé zakalení, nízká teplota popouštění, krátké nebo dlouhé popouštění a

nestejně rozložení teploty v peci mívají za následek špatné mechanické hodnoty. Náprava je možná novým ohřevem a vytvrzením. Zbarvení povrchu a značná oxidace jsou následkem špatného očištění výrobků nebo přehřátí[10]. Bublinatý povrch, zvlnění povrchu, krupičkovitý povrch a zároveň zemitý lom následkem vnitřních mezikrystalových vycezenin svědčí o velkém přehřátí a nelze je napravit[10]. Trhliny po zakalení, zvláště u polotovarů větší tloušťky s nepravidelným průřezem, svědčí o nedostatečném prohřátí. Velká deformace výrobků, spojená často s vlnitým povrchem, svědčí o přehřátí, je-li však tento povrch hladký, nasvědčuje špatnému uložení nebo zavěšení. Povrch šedě korodovaný, vyžraná místa, krupičkovité důlky svědčí, při správné teplotě, o cizím chemickém vlivu, při ohřevu v plynové peci o přítomnosti síry, při ohřevu v solné lázni o účinku nečistot (chloridů, uhličitánů a alkálií)[10].

Zařízení k vytvrzování hliníkových i jiných lehkých slitin se dnes přizpůsobuje těsněji požadavkům na tento proces[10]. Pro ohřívání do vzniku tuhého roztoku je možno použít komorových nebo šachtových pecí s umělým oběhem vzduchu, spolehlivě vytápěných, plynem nebo elektřinou, a regulovaných, popř. popouštěcích solných lázní s dusičnanovou náplní, ovšem rozměrů přizpůsobených výrobkům z lehkých kovů[10].

Ohřev v pecích na vzduchu má některé nevýhody. Je pomalejší a pec udržuje stejnou teplotu jen při umělém oběhu vzduchu ventilátorem. Solná lázeň ohřívá rychleji, má větší tepelnou kapacitu, takže stejněji udržuje teplotu, v menších lázních vlastním prouděním, ve větších pomocí míchadel. Nevýhodou solných lázní je nebezpečí při obsluze a izolační účinek soli při ochlazování. Zvláštní pozornost se věnuje spojení pece s lázní, aby bylo možno polotovary z pece s největší rychlostí zakalit. Tato řešení vyžadují vhodné konstrukční řešení pro pohyb v obou směrech a snadnou manipulaci. Místo van s vodou nebo olejem se používá i van nebo komor se sprchou. Je to řešení konstrukčně jednodušší, protože odpadá jakékoli zařízení pro převod vodorovného pohybu ve svislý.

Umělé stárnutí se provádí v komorových nebo šachtových pecích s oběhem vzduchu a se stejnou teplotou. Protože teploty nepřesahují 200°C, můžeme spíše hovořit o sušárnách než o pecích. Vzhledem k dlouhé době stárnutí je popouštění v oleji výjimkou. U odlitků a výkovků, které stárnou uměle, je možno účelně všechny operace spojit v souvislý proces na lince.

2.7 Vliv tváření na průběh stárnutí

Ve stavu po rychlém ochlazení mají slitiny hliníku obvykle dobrou tažnost. Této vlastnosti se s výhodou využívá při lisování různě složitých výlisků. Z praxe je známo, že zborcení takto vyrobených součástí je menší než stejných součástí lisovaných ve vyžíhaném stavu a poté teprve precipitačně vytvrzovaných[10]. Často se také u hliníkových slitin setkáváme s rovnáním, napínáním nebo válcováním, které se provádí, aby se zabránilo porušení materiálu. Při všech těchto operacích je celková redukce malá a činí obvykle jen několik procent.

Tváření se tedy obvykle provádí ihned po ochlazení. Je to nutné u slitin, které přirozeně stárnou. Pokud již slitina začala stárnout, je v takovém případě tváření už nevhodné, protože může vyvolat vznik místně omezených vnitřních napětí[10]. Tváření v průběhu precipitačního procesu se používá tehdy, chceme-li tím docílit zjemnění precipitátů.

Plastickou deformací za studena se zvětšuje hustota dislokací a vakancí, které představují místa příznivá pro nukleaci precipitujících fází. Vakance, vzniklé v materiálu, urychlují difúzní proces legujících prvků tím, že se přemísťují do Guinier-Prestonových zón, kde vznikají precipitáty. Mírným zvýšením teploty při procesu umělého stárnutí dojde k alespoň minimální difúzi, a tedy k urychlení precipitace. Stačí malá deformace po ochlazení ve vodě, která urychlí stárnutí, a tvrdost tvářené slitiny se intenzivně zvětšuje. Konečná tvrdost tvářených slitin po stárnutí bývá vyšší než u slitin, které tvářeny nebyly. Zvýšení tvrdosti však bývá spojeno s poklesem houževnatosti. Vyšší tvrdost ovšem slitina ztrácí poměrně rychle, pokud je po vytvrzení během provozu znovu ohřívána[10]. Čím větší je deformace za studena, tím rychleji však dochází k přestárnutí materiálu.

Tažení je používáno z několika důvodů. Prvním důvodem je kalibrace rozměrů, protože lisováním není možno dosáhnout užších tolerancí. Dalším důvodem je výroba trubek menších rozměrů, které není možné vyrobít lisováním a je nutno je tahat z větších preparátů. Posledním, rozhodujícím důvodem pro technologii tažení trubek, je nutnost docílit vyšší mechanické hodnoty[11].

3. Experimentální část

3.1 Chemické složení slitiny a její označení

Na zařízeních společnosti Alcan Děčín Extrusions s.r.o. byly provedeny dvě tavby, C5037 a C8191 (označení je podle vnitřních předpisů podniku), z nichž byly odebrány dva odlitky, čepy. Chemické složení odlitků je uvedeno v tabulce 3.1.1a,b. Tabulka 3.1.2 uvádí chemické složení slitiny Stanal 32 - AA 6023 (AlMgSiSnBi) podle materiálových listů podniku. Dosažené chemické složení odlitků z uvedených taveb odpovídá složení slitiny Stanal 32.

Čep připravený z odlitku tavby označené C5037 byl dále podroben homogenizačnímu žíhání, které se provádí v průmyslové plynové homogenizační peci. Homogenizační ohřev probíhal po dobu 8 hodin při teplotě 545°C, obsahoval i náhřev na danou teplotu po dobu 4 až 6 hodin.

Čep má po odlití dendritickou strukturu, uvnitř dendritů je ale chemické složení nestejnoměrné. Homogenizačním ohřevem se toto složení uvnitř dendritů vyrovná, materiál je pak lépe tvárný, lze ho lépe lisovat. Druhý čep nebyl homogenizován.

Tab. 3.1.1a - Chemické složení tavby C5037 (v hmotnostních %). Ze slitiny byly lisované tyče kruhového průřezu.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Bi	Sn
0,930	0,170	0,344	0,546	0,744	0,004	0,010	0,030	0,002	0,047	0,545	0,791

Tab. 3.1.1b - Chemické složení tavby C8191 (v hmotnostních %). Ze slitiny byly lisované trubky.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Bi	Sn
0,880	0,140	0,288	0,582	0,734	0,002	0,000	0,021	0,002	0,016	0,533	0,812

Tab. 3.1.2 - Chemické složení (v hmotnostních %) slitiny Stanal 32 - AA 6023 (AlMgSiSnBi) podle materiálových listů podniku. [11]

Základní prvky							Ostatní prvky		Al
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Sn	Bi	každý	celkem	
0,6-1,4	0,5	0,2-0,5	0,2-0,6	0,4-0,9	0,6-1,2	0,3-0,8	0,05	0,15	zbytek

3.2 Podmínky lisování

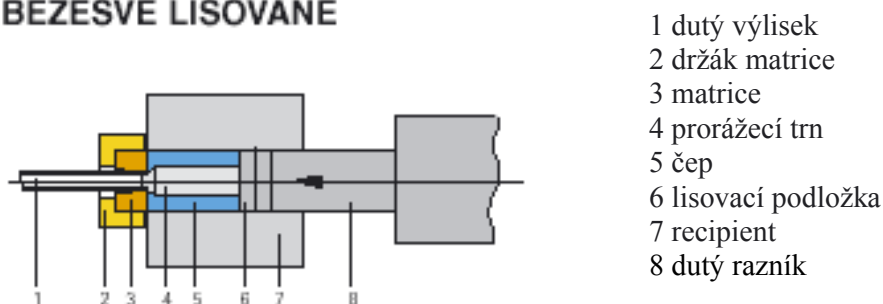
Průtlačné lisování čepů z experimentální slitiny bylo realizováno na provozních lisech v uvedeném podniku. Ze slitiny tavby C5037 byly lisované tyče kruhového průřezu, ze slitiny tavby C8191 se lisovaly trubky.

Lisování probíhá za vysokých teplot, teplota čepů je v rozmezí 480 až 520°C, jde tedy o tváření slitiny za tepla. Lisováním vzniká v recipientu před matricí deformační (přetvárné) teplo, čímž se teplota lisování ještě asi o 20°C zvýší. Za matricí má vylisovaná tyč teplotu 520 až 540°C, což odpovídá teplotě rozpouštěcího ohřevu, vzniká už tedy v materiálu tuhý roztok. Lisování za tepla probíhalo výtakovou rychlostí 6,5m/min, po dobu asi 2minut.

Z čepu o rozměru 298mm(průměr) x 700mm(délka), z tavby C5037, byly vylisovány tyče o průměru 27,05 až 27,15mm. Lisování bylo provedeno na nepřímém lise o výtlačné síle 30MN, průměr recipientu je 306mm (tj.charakteristika lisu).

Trubky, z čepu o rozměru 248mm(průměr) x 450mm(délka), z tavby C8191, se lisovaly na přímém lise o výtlačné síle 35MN, průměr recipientu 255mm. Trubky byly na rozměr 40x5mm vylisovány způsobem, který znázorňuje obr.3.2.1, tzv. lisováním na trn. Při výrobě obtéká materiál trn, tudíž nedochází k žádným lisovacím podélným svarům, které vznikají obtékáním můstků v komorové matrici. Tento způsob je určen pro lisování trubek z těžce tvářitelných slitin a trubek, u kterých dochází k vysokému stupni přetváření [11]. Dalším způsobem lisování trubek je lisování přes komorovou matrici. Při něm se materiál dělí v předkomorách a znovu spojuje po obtečení můstků, které drží trn ve zbytku matrice. Z tohoto důvodu vznikají při tomto způsobu lisovací můstky, svary. Tento způsob je určen pro lisování lehce tvářitelných slitin[11]

BEZEŠVÉ LISOVANÉ



Obr.3.2.1 – Lisování dutých polotovarů na prorážecí trn. [11]

3.3 Podmínky tepelného zpracování a tažení výlisků

Z vylisovaných tyčí a trubek byly odebrány vzorky na tažení, které byly podrobeny tepelnému zpracování.

Výstupní teplota výlisku dosahuje hodnot teploty rozpouštěcího ohřevu, 520-540°C, takže vzniká v materiálu tuhý roztok. Bezprostředně po lisování, tedy za matricí na lisu, následuje kalení vy lisovaných tyčí vodní vlnou, o teplotě vody asi 20 až 30°C. Po kalení má polotovar teplotu asi 30°C a je uložen při pokojové teplotě asi 23°C k procesu přirozeného stárnutí.

Redukci při tažení, tedy deformaci za studena, můžeme spočítat jednoduchým vzorcem a vyjádřit v procentech:

$$\varepsilon = (S_0 - S_1) / S_0 * 100\% ,$$

kde S_0 ... průřez před tažením
 S_1 ... průřez po tažení

Vzorky slitiny byly pro experiment připraveny následujícím způsobem:

- Tyče:

1. lisované tyče o $\varnothing 27,1$ mm netažené, tedy s 0% redukcí,
2. lisované tyče tažené malým tahem na $\varnothing 26,95$ z 27,15 mm, s 1,5% redukcí,
3. lisované tyče tažené velkým tahem na $\varnothing 26,00$ z 27,07 mm, s 7,7% redukcí.

- Trubky:

1. lisované trubky tažené na $\varnothing 34,5 \times 4,25$ mm z 40 x 5 mm, tedy s 26,5% úběrem,
2. tažené trubky byly podrobeny tepelnému zpracování separátním rozpouštěcím ohřevem při teplotě 540°C po dobu 40 minut a následným zakalením ve věžové kalicí peci, poté byly trubky po dobu 1 dne uloženy k procesu přirozenému stárnutí při pokojové teplotě 23°C,
3. polovina trubek byla poté znovu tažena, a to na $\varnothing 31 \times 3,5$ mm, tedy s 25% úběrem.

Tab. 3.3.1 – Označení vzorků pro experiment.

1 – 15	Tyče lisované netažené (průměr 27,10 mm), $\varepsilon = 0\%$
16 – 30	Tyče málo tažené (průměr 26,95 mm), $\varepsilon = 1,5\%$
31 – 45	Tyče víc tažené (průměr 26 mm), $\varepsilon = 7,7\%$
1 – 15	Trubky po kalení netažené (průměr 34,5 mm), $\varepsilon = 0\%$
16 – 30	Trubky po kalení tažené (průměr 31 mm), $\varepsilon = 25\%$

3.4 Podmínky vytvrzování

Všechny vzorky lisovaných a tažených tyčí a trubek byly následně podrobeny procesu vytvrzování.

Přírozené stárnutí, tedy časové období mezi kalením a tažením tyčí, trvalo 10dní a probíhalo při pokojové teplotě asi 23°C. Po tažení následovaly další 4dny do začátku procesu umělého stárnutí, během kterých se postupně odebíraly vzorky k uložení do pece.

Vytvrzování v peci (obr.3.4.1) probíhalo ve třech dnech při teplotách 150, 160 a 170°C po dobu 6, 8, 10, 12 a 14hodin, jak je uvedeno v tab. 3.4.1.



Obr. 3.4.1 – Pec CHIRANA typ STF 39/II s cirkulací vzduchu, výrobní číslo 700188, technické údaje ze štítku: R02, 220V, 2200VA, 50Hz, 100kg.



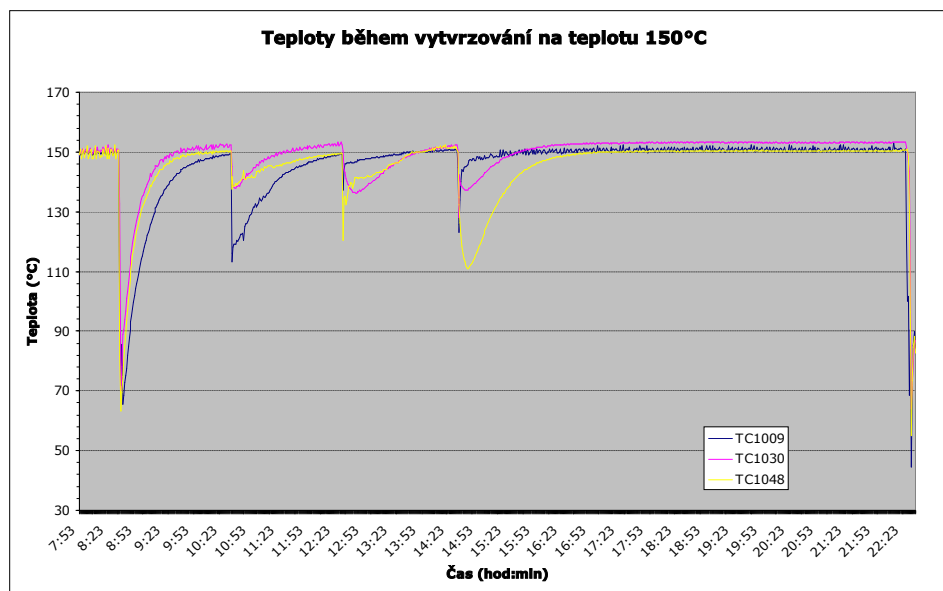
Tab. 3.4.1 – Plán procesu vytvrzování.

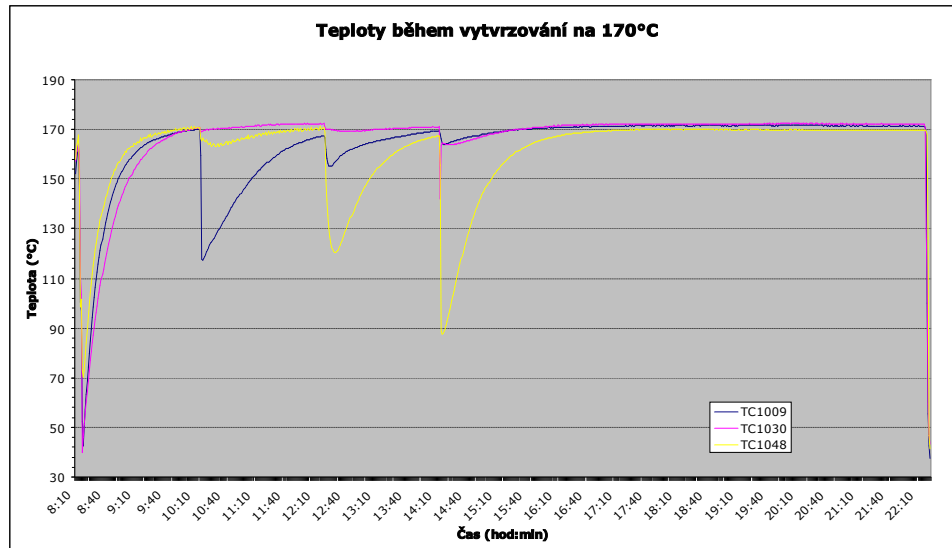
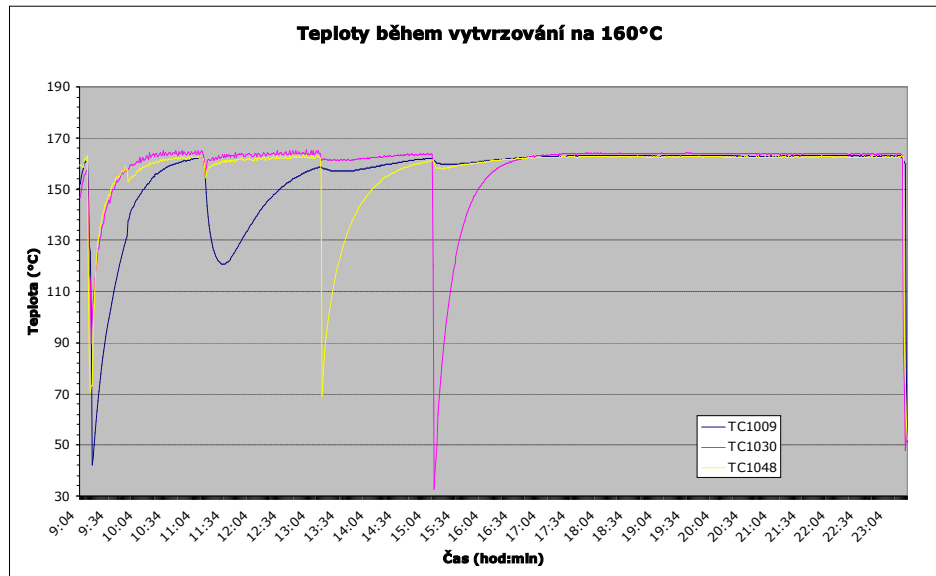
Čas vložení vzorku do pece [hod]	Čas vyjmutí vzorku z pece [hod]	Celková doba [hod]
9:00	15:00	6
9:00	23:00	14
11:00	23:00	12
13:00	23:00	10
15:00	23:00	8

Teplota v peci byla během procesu vytvrzování kontrolována. Zapisovač OMEGA OM-170E, konfigurace: dva dvoukanálové moduly, tři termočlánky, vzorkovací frekvence 60s. Měřicí přístroj je vidět na obr.3.4.1.

Umístění termočlánků v peci bylo následující: TC1009 vpravo, TC1030 vlevo vzadu a TC1048 uprostřed pece. Obr.3.4.2 zobrazuje grafy teplot naměřených v průběhu doby celého umělého stárnutí. Odchyłky teplotních hodnot od teplot, na které se vytvrzovalo, byly způsobeny vložením nových chladných vzorků a také nedokonalým těsněním dveří pece.

Obr.3.4.2 – Grafy teplot v průběhu vytvrzování v peci.





3.5 Mechanické zkoušky

Mechanické vlastnosti slitiny Stanal 32 byly zjišťovány vždy u tří vzorků z každé skupiny, jak je vidět v tabulce 3.4.2. Hodnoty mechanických vlastností byly získány z tahové zkoušky na trhacím stroji (obr.3.5.1) na pracovišti mechanické zkušebny oddělení řízení jakosti ve společnosti Alcan Děčín Extrusions s.r.o.

Trhací stroj má automatický průtahoměr. Ramínka extenzometru, nahoře i dole na rozměru L_0 , se plynule roztahují podle velikosti deformace, a tu měří. Výsledky jsou pak zaznamenány na samostatném PC, který řídí průběh a zpracovává výsledky každé trhací zkoušky (pro příklad uvádím v příloze protokol o provedené zkoušce, obr.3.5.2).



Obr.3.5.1 – Trhací stroj značky INSTRON model 1186, jehož maximální tažná síla je 200kN; nejistota měření síly je 1% (tj. jen nepřesnost přístroje, nezahrnuje nepřesnosti jednotlivých částí a komponentů stroje).

Příprava vzorků na mechanické zkoušky probíhala také ve výše uvedeném podniku.

Tyče s původním průměrem 27,1mm , 26,95mm a 26mm o délce 320mm byly nejprve hrubovány na soustruhu na průměr 20mm a zkráceny na délku 300mm. Tvar tyče byl vysoustružen tak, aby odpovídal tvaru normovaných zkušebních tyčí. Zúžená střední část zkoušené tyče měla průměr 16mm a délku $L_0=5 \times d_0=5 \times 16=80\text{mm}$.

Trubky o délce 320mm byly podélně rozříznuty tak, aby výseč na délce oblouku po průřezu byla zhruba 20mm. Na fríze se výřezy trubek vyfrézovaly do tvaru normovaných zkušebních tyčí. Průřez zkoušené tyčky S_0 se přepočtl na kruhový průřez, abychom mohli stanovit délku L_0 .

3.6 Diskuse výsledků a rozbor struktury

V tabulce 3.6.1 jsou uvedeny zaručované hodnoty mechanických vlastností slitiny Stanal 32 podle podnikových materiálových listů. Označení stavů po tepelném zpracování je podle normy ČSN EN 515.

Tab. 3.6.1 - Mechanické vlastnosti slitiny Stanal 32 podle materiálových listů v různých stavech po vytvrzení. [11]

	Stav T6	Stav T8
R _m (MPa)	min.320	min.340
R _{p0,2} (MPa)	min.270	min.310
A ₅ (%)	min.10	min.8

Pozn. k tabulce 3.6.1. Ve stavu T6 je slitina po rozpouštěcím žíhání, kalení a umělém stárnutí. Toto označení se používá u výrobků, které nejsou tvářeny za studena po rozpouštěcím žíhání, nebo u kterých se tváření za studena při vyrovnání nebo napřímění neprojeví na mezích mechanických vlastností[12].

Ve stavu T8 je slitina po rozpouštěcím žíhání, kalení, tváření za studena a umělém stárnutí. Toto označení se používá u výrobků, které jsou ke zlepšení pevnosti tvářeny za studena, nebo u kterých tváření za studena při vyrovnání nebo napřímění má významný vliv na meze mechanických vlastností[12].

Vzorky použité na experiment jsou po lisování a následném kalení ve stavu T1. Tyče netažené, uměle stárnuté (v tabulce 3.6.1.1 označení US), jsou ve stavu T6 nebo T5. Tyče s malou deformací jsou po procesu umělého stárnutí také ve stavu T6 nebo T5. Tyče tažené s větší redukcí jsou pak po vystárnutí ve stavu T8. Trubky po separátním rozpouštěcím ohřevu a následném kalení jsou ve stavu T4 a trubky s velkou deformací provedenou tažením za studena jsou po umělém stárnutí ve stavu T8.

Tab. 3.6.1.1 - Přehled stavů tepelného zpracování u použitých vzorků.

Č.vzorků		Stav před US	Stav po US
1 – 15	Tyče lisované netažené (průměr 27,10mm), $\varepsilon = 0\%$	T1 (T4)	T5 (T6)
16 – 30	Tyče málo tažené (průměr 26,95mm), $\varepsilon = 1,5\%$	T1 (T4)	T5 (T6)
31 – 45	Tyče víc tažené (průměr 26mm), $\varepsilon = 7,7\%$	T2 (T3)	T8
1 – 15	Trubky po kalení netažené (průměr 34,5mm), $\varepsilon = 0\%$	T4	T6
16 – 30	Trubky po kalení tažené (průměr 31mm), $\varepsilon = 25\%$	T3	T8

Tyče

Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 3.6.2 až 3.6.4 v příloze. Obrázky 3.6.1 až 3.6.9 zobrazují grafy mechanických hodnot tyčí v závislosti na době vytvrzování. Průběh křivek má většinou očekávanou závislost; se vzrůstající dobou vytvrzování a teplotou, při které umělé stárnutí probíhalo, vzrůstá pevnost i mez kluzu, zatímco tažnost s průběhem vytvrzování klesá.

Při vytvrzování tyčí na teplotu 150°C, jak je vidět na obr.3.6.1 až 3.6.3, jsme maxima hodnot pevnosti nedosáhli. Teplota je příliš nízká a na mezích mechanických pevností se neprojeví. Proto se ve výrobní praxi tato teplota pro vytvrzování hliníkových slitin nepoužívá. Deformace za studena však posouvá hodnoty tažnosti, a to k nižším hodnotám, proto je při nulové redukci tažnost nejvyšší.

Maximální pevnosti R_m jsme u tyčí s redukcí 7,7% při vytvrzování na teplotě 160°C podle obr. 3.6.6 dosáhli přibližně při 10hodinách doby umělého stárnutí. Pak dochází k přestárnutí materiálu, který tímto ztrácí hodnoty mechanických vlastností. Maximální hodnoty meze pružnosti jsme dosáhli při 12hodinách stárnutí.

Při vytvrzování tyčí na teplotu 170°C, obr.3.6.7 až 3.6.9, došlo k chybnému stanovení tažnosti slitiny. Hodnota tažnosti při 12hodinách umělého stárnutí je velmi vychýlená a křivka nemá plynulý průběh. Odchýlení je pravděpodobně způsobeno chybou v teplotě nebo čase umělého stárnutí na 170°C/12hod.

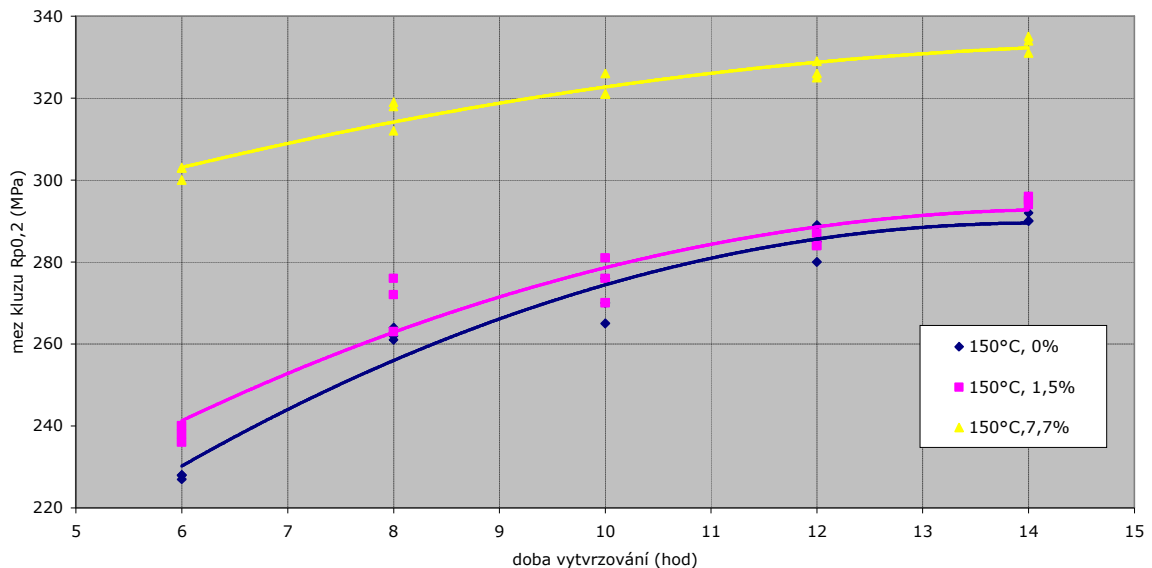
Vliv na hodnoty tažnosti mohla mít také skutečnost, že vzorky byly zřejmě odebrány z různých částí vylisované tyče. Jednotlivé části tyče tedy měly odlišnou teplotu před zakalením, čímž se jejich hodnoty mechanických vlastností mohly podstatně ovlivnit. Začátek čepu má teplotu přibližně 500°C, konec je však ochlazován zátkou, která teplo odvádí. Konec vylisované tyče je tedy zakalen z teploty nižší, a jeho mechanické vlastnosti tudíž nedosáhnou takových hodnot.

Tab. 3.6.8 – Tabulka maximálních průměrných hodnot mechanických vlastností dosažených za uvedenou dobu procesu umělého stárnutí.

Teplota(°C)	Redukce(%)	max.Rm(MPa)	max.Rp0,2(MPa)	A5(%)
150	0	361,3+ / 14h+	290,7+ / 14h+	13,6
150	1,5	361,0+ / 14h+	295,0+ / 14h+	13,1
150	7,7	368,0+ / 14h+	333,3+ / 14h+	10,7
160	0	376,0+ / 14h+	330,7+ / 14h+	12,1
160	1,5	373,0+ / 14h+	329,7+ / 14h+	12,2
160	7,7	366,3 / 10h	344,3 / 12h	10,2
170	0	371,0 / 10h	332,7+ / 14h+	12,3
170	1,5	366,7 / 6h	328,0 / 12h	12,0
170	7,7	361,7 / 6h	341,3 / 8h	10,4

V tabulce 3.6.8 jsou pro lepší možnost vyhodnocení vlivu teploty umělého stárnutí a velikosti redukce průřezu předcházející deformace za studena na výsledné mechanické a plastické vlastnosti uvedena maxima průměrných hodnot mechanických vlastností dosažených za uvedenou dobu během procesu umělého stárnutí. Hodnoty tažnosti odpovídají její velikosti v době dosažených maximálních hodnot pevností. V praxi je pro posuzování namáhání součástí důležitá hodnota meze kluzu Rp0,2, proto diskusi provedeme se zaměřením právě na její hodnoty. Pro grafické znázornění jsou zde umístěny i grafy (obr.3.6.10 až 3.6.12), které zobrazují vytvrzovací křivky pro tyče s redukcí všech provedených velikostí při vytvrzování za všech tří teplot.

Obr.3.6.10 - Vytvrzovací křivky tyčí při 150°C

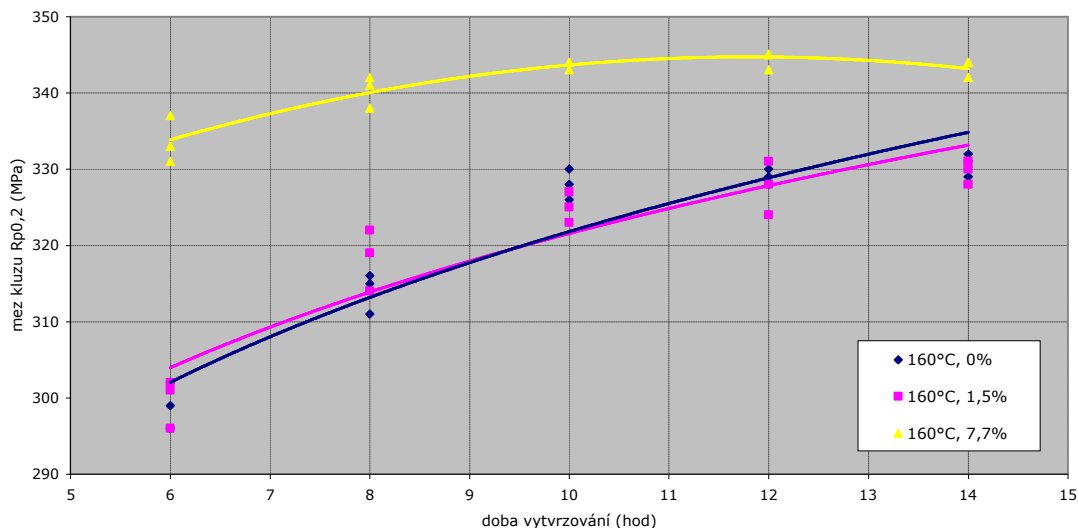


Poměrně nízká teplota 150°C se obecně, jak už bylo uvedeno, v praxi u slitiny AA6023 příliš nepoužívá. Z obr. 3.6.10 je vidět, že hodnoty mechanických vlastností zřejmě nedosahují úplného maxima ani po době 14hodin procesu umělého stárnutí. Pro dosažení požadovaných hodnot maximální pevnosti bychom tedy potřebovali více času, hodnoty max.Rm a max.Rp0,2 jsou proto v tabulce 3.6.8 v příslušných kolonkách označeny znaménkem “+”.

Průběh stárnutí tyčí s nulovou a 1,5% redukcí se příliš neliší. Křivky mezí kluzu mají podobný průběh a lze tedy říci, že při teplotě 150°C malá deformace za studena pevnost materiálu ovlivnila jen nepatrně. Nelze ovšem určit, jestli je mírné zpevnění následkem deformace, tedy je-li deformačním zpevněním, nebo se proces stárnutí malou deformací jen urychlil. V prvním případě by teoreticky měla pevnost tažené tyče dosahovat vyšších hodnot než u tyče netažené, v druhém případě by byly hodnoty stejné.

Podstatně vyšší Rp0,2, zhruba o 35MPa, se objevuje u tyče se 7,7% redukcí. Ani tady však nelze určit maximum. Na základě teorie můžeme usuzovat, že jeho hodnota bude vyšší než hodnota pevnosti tyčí s menší deformací a že k jeho dosažení dojde v kratším čase. Zvýšení pevnosti je však provázáno snížením tažnosti, protože deformací za studena se materiálu ubírá jeho plasticita.

Obr. 3.6.11 - Vytvrzovací křivky tyčí při 160°C



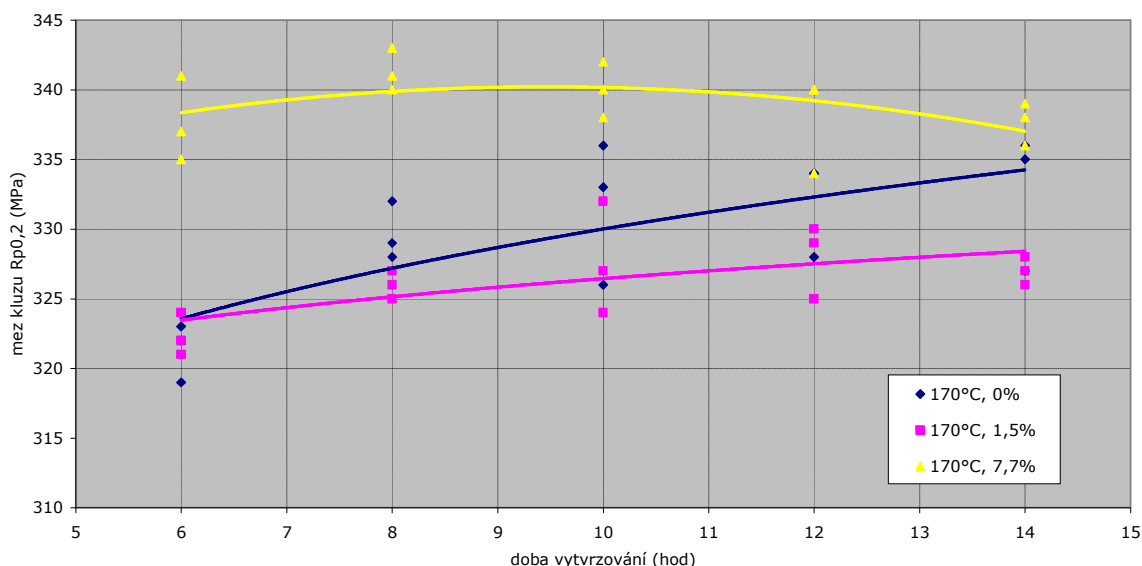
Při teplotě 160°C se úplného maxima pevností tyčí s nulovou a malou deformací opět nedosáhlo. Jeho hodnota tedy leží někde za dobou 14hodin.

Podstatně lépe jsou na tom tyče se 7,7% redukcí, u nichž se maximum $R_{p0,2}$ objevuje po 12hodinách vytvrzování. Proces stárnutí se deformací urychlil a maximální $R_{p0,2}$ je o cca o 10MPa vyšší než u obou nižších deformací. Po dosažení maxima $R_{p0,2}$ na 12hod. umělého stárnutí dochází k přestárnutí materiálu a hodnoty pevnosti opět klesají. Křivka má v místě maxima plochý průběh.

Tyče vytvrzené při 170°C vykazují vyšší hodnoty meze kluzu. Pro nulovou deformaci se sice opět nepovedlo dosáhnout maxima, ale lze předpokládat, že jeho průběh bude plochý. Ploché maximum je v praxi výhodné, protože zajišťuje dostatek času pro rovnoměrné vytvrzení polotovarů v peci. Jednotlivé části vsázky musí být v peci vhodně uloženy tak, aby se minimalizovaly odchylky a vytvrzení probíhalo rovnoměrně ve všech místech.

Také krátká doba stárnutí je v praxi žádaná, ovšem ne na úkor špatně vytvrzeného materiálu. Čím kratší jsou totiž časy, tím strmější je průběh vytvrzovací křivky a maximum je ostré. Při vytvrzovací teplotě 170°C už se jasně projevuje, že deformace za studena zrychluje průběh vytvrzování. Redukce 7,7% tedy stárnutí urychlila, takže maxima bylo dosaženo už po 8hodinách vytvrzování.

Obr. 3.6.12 - Vytvrzovací křivky tyčí při 170°C



Porovnáme-li maxima hodnot meze kluzu pro všechny vytvrzovací teploty a časy (tab. 3.6.8), lze podle teoretických poznatků (obr. 2.3.1) a dosažených výsledků říci, že optimální teplotou režimu umělého stárnutí tyčí ze slitiny Stanal 32 je zřejmě teplota 160°C až 170°C a doba 10 až 12 hod. Při nižší teplotě, tedy při 150°C, hodnoty mechanických vlastností ještě nedosahují takových mezí a k vytvrzení na tyto hodnoty je potřeba velmi dlouhá doba. Teplota 170°C pak opět hodnoty meze kluzu nepatrně snižuje, i když pro dosažení stačí kratší čas.

Optimální teplota, vyvozená z experimentu, je v souladu s předpisy společnosti Alcan Děčín Extrusions s.r.o. určenými pro vytvrzování výlisků pro dosažení stavu T6 s maximální pevností. V provozu podniku se používá režim umělého stárnutí slitiny Stanal 32 podle vytvrzovací receptury 170°C / 10hodin.

Doporučením pro tyče, které jsou před vytvrzováním podrobeny tažení s redukcí cca 7%, by tedy byl režim vytvrzení při 170°C po dobu 8 až 12hodin. Pro tyče pouze lisované by však toto doporučení neplatilo. Takto zpracované polotovary potřebují pro vytvrzení delší dobu, minimálně 14hodin, protože jejich průběh stárnutí není urychlen deformací za studena. Optimální vytvrzovací teplotou by pro ně bylo rozmezí 160 až 170°C.

Trubky

Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 3.6.5 až 3.6.7 v příloze. Obrázky 3.6.13 až 3.6.18 zobrazují grafy mechanických hodnot trubek v závislosti na době vytvrzování. Průběh křivek má většinou očekávanou závislost; se vzrůstající dobou vytvrzování a teplotou, při které umělé stárnutí probíhalo, vzrůstá pevnost i mez kluzu, zatímco tažnost s průběhem vytvrzování klesá.

Tab. 3.6.9 – Tabulka maximálních průměrných hodnot mechanických vlastností dosažených za uvedenou dobu procesu umělého stárnutí.

Teplota(°C)	Redukce(%)	max.Rm(MPa)	max.Rp0,2(MPa)	A5(%)
150	0	275,7+ / 14h+	192,3+ / 14h+	20,3
150	25	334,0 / 12h	304,7 / 12h	11,0
160	0	300,0 / 12h	237,3+ / 14h+	17,1
160	25	331,0 / 6h	305,7 / 6h	10,9
170	0	300,7+ / 14h+	250,3+ / 14h+	14,4
170	25	315,3 / 6h	300,7 / 12h	9,0

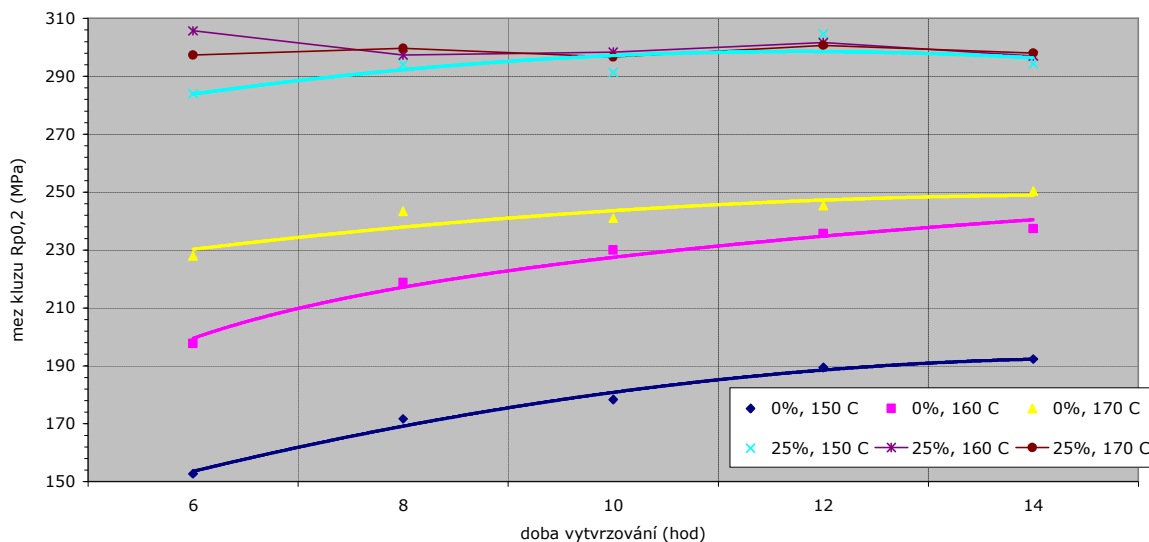
V tabulce 3.6.9 jsou opět pro možnost srovnání uvedena maxima průměrných hodnot mechanických vlastností dosažených za uvedenou dobu během procesu umělého stárnutí. Hodnoty tažnosti odpovídají její velikosti v době dosažených maximálních hodnot pevností. Diskusi opět provedeme se zaměřením na hodnoty meze kluzu Rp0,2, která je důležitá pro provozní určování namáhání zatížených součástí. Pro grafické znázornění je zde uveden i graf (obr.3.6.19), který zobrazuje vytvrzovací křivky pro trubky rekrystalizované i s redukcí při vytvrzování za všech tří teplot.

Trubky byly po vylisování taženy za studena redukcí průřezu $\varepsilon = 26,5\%$. Dále byly podrobeny procesu separátního rozpouštěcího ohřevu a následného kalení, čímž dosáhly jemnozrnně rekrystalizované struktury, která má velmi dobré plastické vlastnosti. Tažnost těchto polotovarů je tedy oproti tyčím velmi vysoká, a to i v průběhu vytvrzování, při kterém klesá. Zvýšení plasticity trubek díky rekrystalizované struktuře je však doprovázeno snížením jejich pevnostních hodnot v důsledku ztráty lisovacího efektu. Z tabulky 3.6.9 je patrné, že tento pokles pevnosti je tak výrazný, že ani nejvyšší dosažená $R_m = 300,7\text{MPa}$ a $R_{p0,2} = 250,3\text{MPa}$ po následném umělém stárnutí při 170°C po dobu 14hodin nedosahují zaručovaných hodnot pevností pro stav T6 dle podnikového materiálového listu (tab.3.6.1 – $R_m = \text{min.}320\text{MPa}$, $R_{p0,2} = \text{min.}270\text{MPa}$).

Vhodné by v tomto případě bylo provedení dalších experimentálních prací, jež by prodlužováním doby umělého stárnutí na více než 14hodin a otestováním také vyšších teplot na úrovních 180 až 190°C mohly pravděpodobně vést k maximům pevností R_m i $R_{p0,2}$.

Vzhledem k nízkým pevnostem dosaženým u rekrystalizované struktury ve stavu T6 (nulová deformace za studena) byla pro další test zvolena poměrně velká deformace za studena s redukcí průřezu $\varepsilon = 25\%$, která by pevnosti měla podstatně zvýšit. Ani tímto mimořádně vysokým deformačním zpevněním se však žádným z následných režimů umělého stárnutí nedosáhlo takových hodnot pevností, které by odpovídaly mezím pevností tyčí.

Obr. 3.6.19 - Vytvrzovací křivky trubek



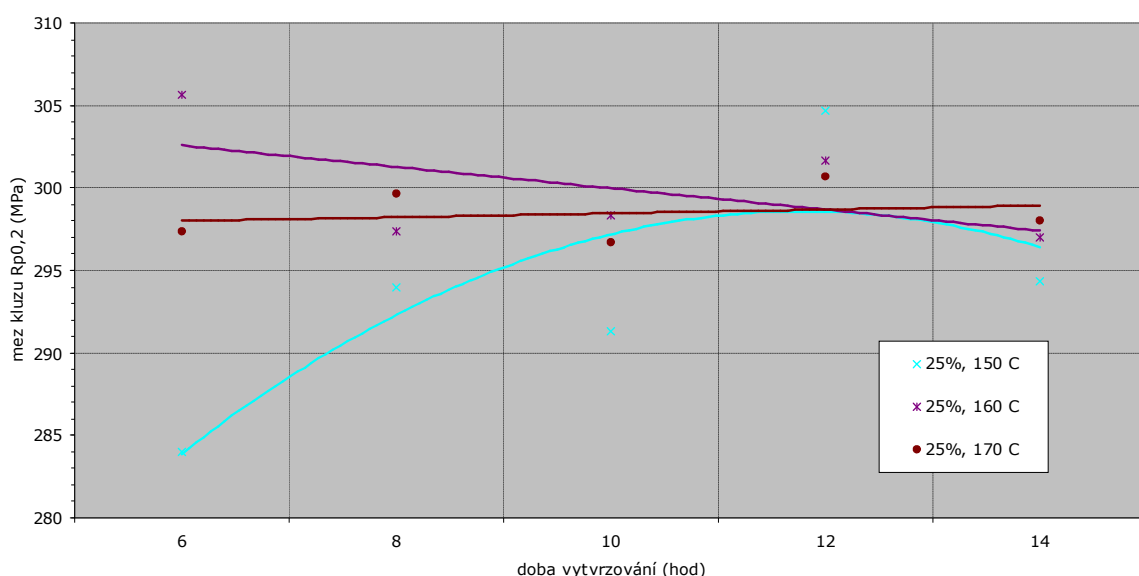
Trubky po separátním rozpouštěcím ohřevu a po kalení netažené, tedy s nulovou deformací za studena, vykazují velmi vysoké hodnoty tažnosti, ale jejich pevnost a mez kluzu jsou velmi nízké. Úplného maxima meze kluzu nebylo dosaženo ani po 14hodinách vytvrzování. Tvar křivek je plochý a stárnutí má tedy pomalý průběh.

Deformace trubek za studena způsobila urychlení procesu umělého stárnutí (obr.3.6.20). Při vytvrzování na teplotu 150°C bylo dosaženo maxima po 12hodinách, při vytvrzování na vyšší teploty, už se maxima meze kluzu pohybují zřejmě před dobou 6hodin. Se zvoleným rozsahem časů umělého stárnutí (6 až 14hodin) se už tedy pravděpodobně nacházíme

v oblasti přestárnutí materiálu. Jednoznačné maximum, tedy dobu jeho dosažení, ale nelze v tomto případě určit. Vyžaduje to další experimentální měření.

Průběhy vytvrzovacích křivek pro teploty 160 a 170°C, pokud bychom je neproložili “spline” křivkou, by měly v celém zvoleném rozmezí experimentální doby stárnutí kmitavý charakter. Ve srovnání s průběhem vytvrzovacích křivek tyčí, které se vlivem zvyšující se teploty nacházejí dále od sebe, kmitají křivky trubek téměř společně. Jejich hodnoty se příliš neliší a obě křivky přestárnutí mají velmi pomalý průběh.

Obr.3.6.20 - Trubky s 25%redukci, vytvrzovací křivky pro 150, 160 a 170°C



Velký úběr trubek, který byl proveden pro experimentální účely v této diplomové práci, se v praxi nepoužívá. Takto deformovaný polotovár totiž ztrácí plasticitu a při zatížení velmi rychle praská. Stavů T8, v kterém se nacházíme, se většinou dosahuje menší redukcí, přibližně v rozmezí 8 až 13%. Při překročení určité maximální hodnoty deformace se materiál při následném pokusu o další redukcí trhá.

V porovnání s materiálovými předpisy (tab.3.6.1) pevnostní hodnoty experimentálně zkoušených trubek ve stavu T8 nevyhovují. I přes velkou deformaci provedenou po kalení je materiál schopen dosáhnout pouze takových hodnot, jaké tabulka uvádí pro stav T6. Lze tedy doporučit změnu v předpisech pro mechanické vlastnosti polotovarů z materiálu Stanal 32; ponechat hodnoty dosažitelných pevností pro tyče a oddělit část, s nižšími hodnotami pevností a vyššími hodnotami tažností, pro rekrystalizované trubky.

Struktura vzorků

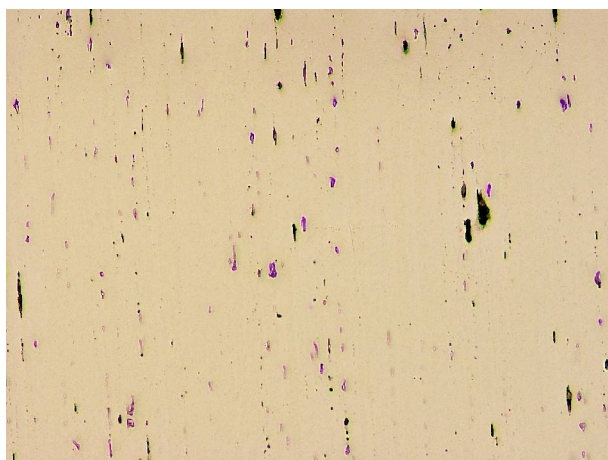
Rozbor struktury vzorků slitiny Stanal 32 nebyl předmětem diplomové práce. Podle teoretických předpokladů a některých praktických poznatků z oblasti výzkumu bezolovnatých hliníkových slitin lze však usuzovat, jakou strukturu slitina v různých etapách zpracování bude mít.

Tyče, které byly vylišovány z homogenizovaných čepů, budou mít po tváření strukturu nerekrystalizovanou, která bude vykazovat výraznou řádkovitou texturu, tedy strukturu se zrna silně protaženými ve směru toku materiálu (obr.3.6.21). Materiál z nehomogenizovaných čepů, určený pro výrobu trubek, bude po lisování vykazovat také nerekrystalizovanou strukturu, protože hůře dynamicky rekrystalizuje během lisování za tepla. Po rozpouštěcím ohřevu a zakalení je struktura velmi hrubozrnně rekrystalizovaná. Tyče i trubky se strukturu vláknitou, po lisování i tažení, tedy vykazují lisovací efekt, který je příčinou vyšších pevností ve směru lisování.

Struktura trubek po separátním rozpouštěcím ohřevu je už rekrystalizovaná (obr.3.6.22). Dostatečně velkou deformací za studena provedenou před rozpouštěcím ohřevem se v materiálu nahromadí deformační energie a zvýší se hustota mřížkových poruch, které pak slouží jako krystalizační zárodky. Díky tomu se při rozpouštěcím ohřevu iniciuje rekrystalizace, která vede k jemnozrnně rekrystalizovanému zrna. Rekrystalizací mizí presefekt a textura se vytratí. Rozdíl pevností je díky tomu až 80-100MPa. Je to výhodné spíše pro plastické vlastnosti materiálu, zvýší se tažnost, ale pevnosti jsou malé. Jemná zrna mají téměř globulární charakter, nepatrně protažený do směru předchozího lisování.

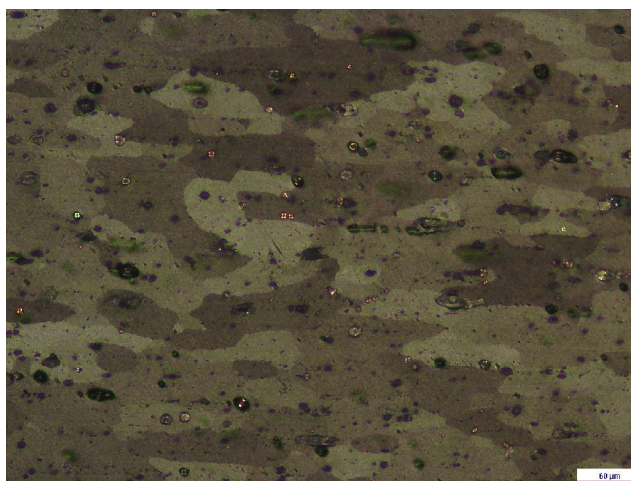
Velkou deformací trubek, v tomto případě 25%, se pevnost zase zvýší, ale presefekt se deformačním zpevněním nedožene.

Po vytvrzení má materiál s řádkovitou strukturou v podélném směru větší pevnost. Odstraní-li se efekt vytvrzení, pak je pevnost nižší. Zachováním presefektu, resp. nerekrystalizované struktury, se dosáhne jejího podstatného zvýšení. Sn a Bi se neúčastní vytvrzování, spíše ho brzdí – ubírají vakance, a tím se omezuje difúze a zhoršují se podmínky stárnutí.



Obr.3.6.21 – Ukázka vláknité nerekrystalizované struktury tažené kruhové tyče z materiálu Stanal 32 – AlMgSiSnBi, stav T8. Mikrostruktura v podélném řezu, 100x zvětšení, vzorek mechanicky broušen, leštěn a leptán roztokem kyseliny fosforečné.

Vyloučené intermetalické fáze SnBi (černé body) a Mg₂Si (fialkové body) jsou rovnoměrně rozložené a vykazují jemné uspořádání v řádcích ve směru tváření. [13]



Obr.3.6.22 – Ukázka rekrystalizované struktury středové části průřezu lisované (netažené, tedy s 0% redukcí) trubky z materiálu Stanal 32 – AlMgSiSnBi, stav T6.

Mikrostruktura v podélném řezu, 100x zvětšení, vzorek mechanicky broušen, elektrolyticky leptán a anodicky upraven (Barkerova metoda). [13]

Statistické zhodnocení výsledků

Pro experiment bylo použito 135 vzorků tyčí a 90 vzorků trubek. Z tahové zkoušky tedy bylo celkem získáno 225 hodnot pevnosti R_m , meze kluzu $R_{p0,2}$ a tažnosti A_5 .

Získané hodnoty (tab.3.6.2 až 3.6.7) lze rozdělit do skupin podle teploty a doby vytvrzování a dále podle velikosti redukce provedené na jednotlivých vzorcích. Na každou skupinu tedy vychází tři vzorky. Trojice hodnot byly podrobeny dvouvýběrovému testu hypotéz. Porovnávaly se vždy trojice nejmenších a největších hodnot, přičemž se předpokládalo, že trojice s hodnotami mezi testovanými trojicemi budou rovněž odpovídat výsledku testu. Testy byly provedeny pro hladinu významnosti 5%.

Výsledky dvouvýběrových F-testů lze vyhodnocovat podle vypočtené hodnoty testovacího kritéria F v porovnání s příslušnou kritickou hodnotou F_{krit} nebo z pravděpodobnosti. Pro zamítnutí hypotézy, že soubory testovaných dat mají shodné rozptyly, musí platit $F > F_{krit}$. Hypotézu není možné zamítnout, je-li pravděpodobnost nad požadovanou hladinou významnosti, tedy pokud je $P > 0,05$.

V případě experimentálně získaných hodnot není výsledek testů jednoznačný. V mnoha případech lze hypotézu zamítnout, ale pro ostatní výsledky bychom ji mohli považovat za platnou. Spolehlivost testů je bohužel ovlivněna malým počtem vzorků v každé skupině. Testy v takových případech mohou velmi klamat, protože malý počet dat neodpovídá normálnímu rozdělení, na kterém jsou tyto testy založeny. Příklady výsledků testu jsou uvedeny v tabulce 3.6.10.

Tab.3.6.10 – Příklady výsledků dvouvýběrových *F*-testů.

Tyče vytvrzené při 170°C po dobu 10hod (s redukcí 0 a 7,7%)

	<i>Soubor 1</i>	<i>Soubor 2</i>
Stř. hodnota Rm	371	360,3333
Rozptyl	19	0,333333
Pozorování	3	3
Rozdíl	2	2
F	57	
P(F<=f) (1)	0,017241379	
F krit (1)	19,00002644	

Trubky vytvrzené při 160°C s redukcí 25% (po dobu 10 a 12hod)

	<i>Soubor 1</i>	<i>Soubor 2</i>
Stř. hodnota Rm	317	318,666667
Rozptyl	13	0,33333333
Pozorování	3	3
Rozdíl	2	2
F	39	
P(F<=f) (1)	0,025	
F krit (1)	19,0000264	

Trubky vytvrzené při 160°C po dobu 12hod (ts redukcí 0 a 25%)

	<i>Soubor 1</i>	<i>Soubor 2</i>
Stř. hodnota Rm	300	318,6667
Rozptyl	19	0,333333
Pozorování	3	3
Rozdíl	2	2
F	57	
P(F<=f) (1)	0,017241	
F krit (1)	19,00003	

4. Závěr

Cílem diplomové práce bylo stanovit na základě výsledků mechanických zkoušek optimální režim umělého stárnutí pro výlisky s různým stupněm deformace provedené po rozpouštěcím ohřevu. Pro experiment byla použita hliníková slitina AlMgSiSnBi s obchodním označením Stanal 32, z níž byly připraveny tyče s vláknitou strukturou a zachovaným lisovacím efektem a trubky s rekrytalizovanou strukturou bez lisovacího efektu. Obojí polotovary byly deformovány za studena tažením s různou velikostí redukce příčného průřezu, rovněž byly připraveny polotovary bez deformace za studena po rozpouštěcím ohřevu a kalení.

Mechanické vlastnosti všech zkoušených tyčí, které byly mezi kalením za matricí a procesem umělého stárnutí tvářeny za studena, splňují zaručované hodnoty pro stav T6 uvedené v materiálových listech společnosti Alcan Děčín Extrusions s.r.o. pro všechny zkoumané teploty umělého stárnutí při dostatečně dlouhých dobách pobytu na teplotě.

Vložená deformace za studena o velikosti redukce průřezu odpovídající 1,5% nemá významný vliv na urychlení procesu stárnutí nebo na dosažení vyšších pevností v rámci zkoumaných teplot 150 až 170°C. Deformace za studena o redukci 7,7% již podstatně urychlí proces stárnutí.

Pro tyče s vláknitou strukturou a s deformací za studena na úrovni 8% je optimální režim pro umělé stárnutí 160 až 170°C po dobu 10 až 12 hodin.

Naopak pro tyče s vláknitou strukturou a bez vložené deformace, nebo s velmi malou deformací do cca 1,5%, je průběh vytvrzování pomalejší a optimální režim pro umělé stárnutí je 160 až 170°C po dobu minimálně 14 hodin. V tomto případě by bylo vhodné u nedeformovaných výrobků v dalších zkouškách otestovat i vyšší teploty, zda by nevedly ke zkrácení doby stárnutí pod 14 hodin při dostatečně vysokém maximu pevností.

Trubky s rekrytalizovanou strukturou mají lepší plastické vlastnosti než tyče, ale ztrátou lisovacího efektu dosahují hodnot pevností až o 80 – 100MPa menších než tyče. Žádným ze zkoumaných režimů umělého stárnutí se nepodařilo dosáhnout hodnot pevností odpovídajících stavu T6 (bez vložené deformace) podle materiálového listu. V rámci rozpětí testovaných teplot a časů byl nejbližší režim 170°C/14h. Bylo by nutné v případných dalších experimentech prověřit ještě vyšší teploty a delší časy. Dosáhnout zaručovaných pevností

pro stav T8 se nepodařilo žádným režimem umělého stárnutí ani při extrémně vysoké deformaci za studena.

Ze získaných výsledků si lze představit trendy do oblastí delších časů i vyšších teplot. Je velmi pravděpodobné, že pro rekrystalizované struktury bez lisovacího efektu bude muset nutně vytvořit rozšíření materiálového listu s nižšími zaručovanými hodnotami pevností a vyšší zaručovanou tažností, než je tomu v současnosti. Je možné konstatovat, že současný materiálový list vyhovuje pouze pro výlisky s vláknitou strukturou, pro výlisky s rekrystalizovanou strukturou by měl být vytvořen nový předpis.

Jak vyplývá z diskuse v předchozí kapitole, k získání úplných výsledků možného tepelně-mechanického zpracování výlisků ze zkoumané slitiny a k optimalizaci podmínek jeho provedení by bylo nutné provést další zkoušky, které by se režimem zpracování pohybovaly mimo rozsah tohoto výzkumu. Výsledek procesu vytvrzování by také bylo možno ověřit provedením zkoušek tvrdosti a vodivosti a stanovit křivky změn těchto vlastností v průběhu procesu umělého stárnutí. Navrhovaný postup by mohl být předmětem další diplomové práce.

Seznam použité literatury:

- [1] Výzkumná zpráva VÚK Panenské Břežany s.r.o. a Alusuisse Děčín s.r.o., projekt Zvýšení užitečných vlastností výrobků z neželezných kovů, zpráva Faltus – Plaček: *Vývoj nové obrobitelné slitiny duralového typu bez olova*. Vydáno 2000, č. VÚK 18/00.
- [2] Chvojka – Brzobohatý: *Zpracování a použití hliníku*, Praha 1961, Státní nakladatelství technické literatury.
- [3] Sedláček, Vladimír: *Neželezné kovy a slitiny*. První vydání, Praha 1979, Státní nakladatelství technické literatury, typové číslo L14-B2-V-31f/41753, č. 04-414-79.
- [4] Macásek, Igor: *Metalurgie litin a neželezných kovů*. Třetí vydání, Praha 1981, Státní nakladatelství technické literatury, č. 05-029-81. Vydavatel Vysoké učení technické v Brně 1980.
- [5] Píšek – Jeníček – Ryš: *Nauka o materiálu I - Nauka o kovech, Neželezné kovy 3.svazek*. Druhé vydání, Praha 1973, Nakladatelství Československé akademie věd, č. 509-21-875.
- [6] Macek – Zuna – Zilvar: *Nauka o materiálu III*, Praha 1987, Státní nakladatelství technické literatury.
- [7] Altenpohl, Dietrich G.: *Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Berlin/Goettingen/Heidelberg/New York 1965, Springer-Verlag, Catalog Card Number 4-23061.
- [8] Plaček, Karel: *Lisovací efekt u slitiny AlCuMg1*. Kandidátská dizertační práce, Vysoká škola technická v Košicích, Děčín 1978.
- [9] Jareš, Vojtěch: *Metalografie neželezných kovů*. Druhé vydání, Praha 1955, Nakladatelství Československé akademie věd, č. 17702/53/III/2.
- [10] Korecký, Jan: *Tepelné zpracování železných a neželezných kovů*. Třetí vydání, Praha 1960, , typové číslo L14-B2-3-I/4340, č. 56/III-5-(B2).
- [11] Materiálové listy materiálu *Stanal 32 – hliníkové polotovary (trubky, tyče)*, prospekty podniku Alcan Děčín Extrusions s.r.o., Děčín 2005.
- [12] Česká norma ČSN EN 515 (42 0053), *Hliník a slitiny hliníku – výrobky tvářené*, Český normalizační institut 1996.
- [13] Michna, Štefan: Zkušební zpráva č.773/2006 a 347/2006. Metalografická laboratoř podniku Alcan Děčín Extrusions s.r.o., Děčín 2006.

Seznam příloh:

Tabulky:

Tab.2.1.1	Vlastnosti technicky čistého hliníku v žíhaném stavu
Tab.2.2.1	Vlastnosti některých tvářených slitin
Tab.2.2.2	Vlastnosti některých slévárenských slitin
Tab.2.3.1	Mechanické vlastnosti slitin Al-Mg-Si
Tab.3.4.2	Doba vytvrzování jednotlivých vzorků při experimentu
Tab.3.6.2	Výsledky tahových zkoušek. Tyče vytvrzované při 150°C
Tab.3.6.3	Výsledky tahových zkoušek. Tyče vytvrzované při 160°C
Tab.3.6.4	Výsledky tahových zkoušek. Tyče vytvrzované při 170°C
Tab.3.6.5	Výsledky tahových zkoušek. Trubky vytvrzované při 150°C
Tab.3.6.6	Výsledky tahových zkoušek. Trubky vytvrzované při 160°C
Tab.3.6.7	Výsledky tahových zkoušek. Trubky vytvrzované při 170°C

Grafy mechanických hodnot v závislosti na době vytvrzování:

Obr.3.6.1	Tyče Ø27mm s deformací za studena 0%, vytvrzené při 150°C
Obr.3.6.2	Tyče Ø27mm s deformací za studena 1,5%, vytvrzené při 150°C
Obr.3.6.3	Tyče Ø27mm s deformací za studena 7,7%, vytvrzené při 150°C
Obr.3.6.4	Tyče Ø27mm s deformací za studena 0%, vytvrzené na 160°C
Obr.3.6.5	Tyče Ø27mm s deformací za studena 1,5%, vytvrzené při 160°C
Obr.3.6.6	Tyče Ø27mm s deformací za studena 7,7%, vytvrzené při 160°C
Obr.3.6.7	Tyče Ø27mm s deformací za studena 0%, vytvrzené při 170°C
Obr.3.6.8	Tyče Ø27mm s deformací za studena 1,5%, vytvrzené při 170°C
Obr.3.6.9	Tyče Ø27mm s deformací za studena 7,7%, vytvrzené při 170°C
Obr.3.6.13	Trubky Ø34,5mm s deformací za studena 0%, vytvrzené při 150°C
Obr.3.6.14	Trubky Ø31mm s deformací za studena 25%, vytvrzené při 150°C
Obr.3.6.15	Trubky Ø34,5mm s deformací za studena 0%, vytvrzené při 160°C
Obr.3.6.16	Trubky Ø31mm s deformací za studena 25%, vytvrzené při 160°C
Obr.3.6.17	Trubky Ø34,5mm s deformací za studena 0%, vytvrzené při 170°C
Obr.3.6.18	Trubky Ø31mm s deformací za studena 25%, vytvrzené při 170°C

Obr.3.5.2 Protokol z mechanické zkoušky. provedené na trhačím stroji v podniku Alcan Děčín Extrusions s.r.o. Tyče průměru 27mm vytvrzené při 160°C.

Přílohy:

Tab. 2.1.1 – Vlastnosti technicky čistého hliníku v žíhaném stavu

(při teplotě 20 °C označeno *)) [6]

Druh hliníku		Al 99,99	Al 99,5
Fyzikální vlastnosti	hustota ρ [kg.m ⁻³]	2700 *)	2700 *)
	teplota tání t_f [°C]	660	659
	měrná tepelná kapacita c_p [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,90 *)	0,93 *)
	délková roztažnost α [K ⁻¹]	22*10 ⁻⁶ *)	22*10 ⁻⁶ *)
	měrná tepelná vodivost λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	230 *)	210 až 220 *)
	konduktivita γ [MS.m ⁻¹]	38 *)	34 až 37 *)
Mechanické vlastnosti *)	mez kluzu R_p 0,2 [MPa]	15	50
	mez pevnosti R_m [MPa]	50	80
	tažnost A_5 [%]	45	30
	kontrakce Z [%]	90	70
	modul pružnosti v tahu E [MPa]	71000	71000
	tvrdost HB	15	20
Technologické vlastnosti	tvářitelnost za studena	velmi dobrá	
	tvářitelnost za tepla	velmi dobrá	
	slévateľnost	obtížná	
	svařitelnost	velmi dobrá, podmíněná	
	pájitelnost	dobrá, podmíněná	
	obrobitelnost	dobrá	

Tab. 2.2.1 – Vlastnosti některých tvářených slitin [6]

Tvářené slitiny Al			
Typ	Slitina	Vlastnosti	Použití
Nevytvrditelné	AlMn1	Odolnost proti korozi	Chemie, letectví
	AlMg3	Odolnost proti korozi, mořské vodě, leštitelnost	Potravinářství, chemie, stavba lodí
	AlMg5		
	AlMg7		
	AlMg4,5Mn1		
Vytvrditelné	AlMgSi0,5	Zpracovatelnost, povrchové úpravy, el. vodivost	Stavebnictví, elektronika
	AlMgSi1		
	AlCu4Mg	Nebezpečí koroze, obtížná svařitelnost, dobré únavové vlastnosti	Běžná slitina pro strojírenství, letectví
	AlCu4Mg1		
	AlCuMgPb	Automatové obrábění	Strojírenství
	AlCu2Ni	Mech.vl. za vyšších teplot	Výkovky, písty, ojnice
	AlZn6MgCu	Velmi dobré mech.vl. i ve svarech, stálost na vzduchu	Letectví, automobilová výroba
	AlZn5Mg2		

Tab. 2.2.2 – Vlastnosti některých slévárenských slitin.[6]

(Pozn. P – lití do pískových forem, K – do kokil, T – tlakové lití.)

Slévárenské slitiny Al			
Slitina	Způsob lití	Možnost vytvrzení	Použití
AlSi3Mn	P,K,T	Ne	Složité tenkostěnné antikorozní výrobky
AlSi10MnMg	P,K,T	Ano	Antikorozní výrobky za námahy
AlSi10Mn	P,K,T	Ne	Dobrá obrobiteľnosť, malá antikorozní odolnosť
AlSi7Mg	P,K	Ano	Dynamicky namáhané součásti, antikorozní
AlSi5Cu4Zn	P,K	Ne	Méně náročné odlitky, malá korozní odolnost
AlSi8Cu2Mn	T	Ne	Motorová vozidla
AlSi10Cu1MnMg	P,K,T	Ne	Složité tenkostěnné odlitky
AlSi12CuMgNi	P,K	Ano	Písty motorů (LOEX)
AlSi20Cu2MnNiMg	K	Ano	Vysocenamáhané písty motorů
AlCu4NiMg	P,K	Ano	Odlitky pro námahu za tepla
AlMg5Si1Mn	P,K	Ne	Dtto,leštitelné, antikorozní
AlMg10	P,K,T	Ano	Vysoce antikorozní odlitky,nádoby

Tab. 2.3.1 – Mechanické vlastnosti slitin typu Al-Mg-Si [6]

Slitiny ČSN	Stav	Chemické složení [%]						Mechanické vlastnosti				Pozn.
		Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	$\sigma_{0,2}$ [hbar]	σ_{Pt} [hbar]	A_{10} [%]	HB [hbar]	
AlMgSi 42 4400	měkký	0,7	0,7	-	0,4	-	-	-	15	16	30-40	plechy
	tvrdý	-	-	0,05	-	0,5	0,05	15	17	4	55-60	
	vytvrzený	1,2	1,2	-	1	-	-	12	20	15	50-70	
AlMgSiCu 42 4451	měkký	0,4	0,5	0,1	0,15	-	-	-	15	20	30-40	plechy
	tvrdý	-	-	-	-	0,5	0,2	-	30	10	70-95	
	vytvrzený	0,9	1,2	0,6	0,6	-	-	-	-	-	-	
AlMgSiFeZn 42 4405	měkký	0,4	0,3	-	-	0,2-	0,05-	-	10	17	-	dráty
	tvrdý	-	-	-	-	0,4	0,15	-	32	5	-	
	vytvrzený	0,6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tab. 3.4.2 – Doba vytvrzování jednotlivých vzorků při experimentu.

Vzorek ϕ [mm]	Doba vytvrzování [hod]	Číslo vzorku
Tyč $\phi 27,10$ (redukce 0%)	6	1,2,3
	8	4,5,6
	10	7,8,9
	12	10,11,12
	14	13,14,15
Tyč $\phi 26,95$ (redukce 1,5%)	6	16,17,18
	8	19,20,21
	10	22,23,24
	12	25,26,27
	14	28,29,30
Tyč $\phi 26$ (redukce 7,7%)	6	31,32,33
	8	34,35,36
	10	37,38,39
	12	40,41,42
	14	43,44,45
Trubka $\phi 34$ (redukce 0%)	6	1,2,3
	8	4,5,6
	10	7,8,9
	12	10,11,12
	14	13,14,15
Trubka $\phi 31$ (redukce 25%)	6	16,17,18
	8	19,20,21
	10	22,23,24
	12	25,26,27
	14	28,29,30

Tab. 3.6.2 – Výsledky tahových zkoušek. Tyče vytvrzované při 150°C

Redukce	Č.vzorku	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A5 (%)	FN	Doba vytvrz.
0%	1	324	228	13,8	3	6 h
	2	328	228	15,9	0	
	3	325	227	16,1	0	
	4	344	261	14,5	3	8 h
	5	347	264	13,8	0	
	6	344	262	14	0	
	7	346	265	14,3	3	10 h
	8	354	276	13,6	0	
	9	351	270	14,1	0	
	10	357	285	13,5	2	12 h
	11	358	289	13,8	0	
	12	354	280	14	0	
	13	362	292	13,2	2	14 h
	14	361	290	13,5	0	
	15	361	290	14,2	0	
1,5%	16	331	240	15,3	3	6 h
	17	327	236	15,9	0	
	18	329	238	14,3	0	
	19	341	263	14	2	8 h
	20	348	276	13,7	0	
	21	348	272	14,2	0	
	22	348	270	14,1	3	10 h
	23	350	276	14,1	0	
	24	353	281	13,4	0	
	25	350	284	12,6	2	12 h
	26	355	287	13,1	0	
	27	355	284	13,1	0	
	28	362	296	13	2	14 h
	29	359	294	13,1	0	
	30	362	295	13,1	0	
7,7%	31	349	300	11,6	2	6 h
	32	351	303	11,9	0	
	33	352	303	11,9	0	
	34	359	319	10,5	2	8 h
	35	360	318	11,3	0	
	36	356	312	11,6	0	
	37	360	321	11,1	2	10 h
	38	365	326	11,1	0	
	39	363	321	11,2	0	
	40	364	326	11,1	2	12 h
	41	363	325	11,2	0	
	42	367	329	11	0	
	43	368	334	10,7	2	14 h
	44	367	331	10,7	0	
	45	369	335	10,6	0	

Tab. 3.6.3 – Výsledky tahových zkoušek. Tyče vytvrzované při 160°C

Redukce	Č.vzorku	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A5 (%)	FN	Doba vytvrz.
0%	1	359	296	13,5	3	6 h
	2	364	302	13,5	0	
	3	359	299	13	0	
	4	368	315	12,8	2	8 h
	5	362	311	12,9	0	
	6	368	316	12,4	0	
	7	373	328	12,2	2	10 h
	8	374	326	12,6	0	
	9	374	330	12,7	0	
	10	373	330	12,2	3	12 h
	11	373	328	12,2	0	
	12	375	329	12,1	0	
	13	375	329	11,8	2	14 h
	14	376	331	12,4	0	
	15	377	332	12,2	0	
1,5%	16	361	301	13,1	2	6 h
	17	360	302	12,7	0	
	18	361	296	14,4	0	
	19	369	322	11,6	2	8 h
	20	369	319	12,5	0	
	21	362	314	12,6	0	
	22	371	327	12,1	2	10 h
	23	370	325	12,4	0	
	24	370	323	12,5	0	
	25	371	328	12	2	12 h
	26	368	324	12,4	0	
	27	372	331	12	0	
	28	373	330	12,2	3	14 h
	29	373	328	12,2	0	
	30	373	331	12,1	0	
7,7%	31	363	333	10,9	2	6 h
	32	366	337	10,8	0	
	33	362	331	11,1	0	
	34	363	338	10,3	2	8 h
	35	367	341	10,4	0	
	36	366	342	10,3	0	
	37	367	344	10,2	2	10 h
	38	367	344	10,4	0	
	39	365	343	10,4	0	
	40	366	345	10,2	2	12 h
	41	367	345	10	0	
	42	365	343	9,9	0	
	43	366	344	9,4	2	14 h
	44	366	344	10	0	
	45	363	342	10	0	

Tab. 3.6.4 – Výsledky tahových zkoušek. Tyče vytvrzované při 170°C

Redukce	Č.vzorku	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A5 (%)	FN	Doba vytvrz.
0%	1	365	319	12,1	2	6 h
	2	369	322	12,9	0	
	3	370	323	12,7	0	
	4	367	328	12,2	2	8 h
	5	372	332	12,1	0	
	6	369	329	11,9	0	
	7	373	333	11,4	2	10 h
	8	374	336	12,1	0	
	9	366	326	12,5	0	
	10	367	328	12,1	2	12 h
	11	373	334	12,2	0	
	12	373	334	12,6	0	
	13	364	327	11,8	2	14 h
	14	373	336	12,1	0	
	15	371	335	12	0	
1,5%	16	368	324	12,4	3	6 h
	17	367	322	12,6	0	
	18	365	321	12,5	0	
	19	363	326	12,1	2	8 h
	20	364	327	11,9	0	
	21	363	325	11,9	0	
	22	363	324	11,7	2	10 h
	23	366	327	12	0	
	24	368	332	11,6	0	
	25	365	329	11,6	2	12 h
	26	363	325	12	0	
	27	366	330	11,9	0	
	28	363	328	11,5	2	14 h
	29	362	326	11,5	0	
	30	364	327	11,8	0	
7,7%	31	364	341	10,4	2	6 h
	32	360	335	10,4	0	
	33	361	337	10,7	0	
	34	360	340	10,3	2	8 h
	35	361	341	10,2	0	
	36	362	343	10,3	0	
	37	360	338	9,9	2	10 h
	38	360	340	9,8	0	
	39	361	342	10,1	0	
	40	358	340	9,8	2	12 h
	41	353	334	10,1	0	
	42	358	340	10,1	0	
	43	357	338	9,6	2	14 h
	44	354	336	9,3	0	
	45	358	339	9,8	0	

Tab. 3.6.5 – Výsledky tahových zkoušek. Trubky vytvrzené při 150°C.

Redukce	Č.vzorku	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A5 (%)	FN	(vzorek)
0%	1	246	150	24,2	3	6 h
	2	252	155	23,7	0	
	3	249	153	23,1	0	
	4	263	173	22,4	3	8 h
	5	263	172	23,9	0	
	6	265	170	22,6	0	
	7	272	186	23,3	2	10 h
	8	265	175	21,9	0	
	9	265	174	22,2	0	
	10	273	191	20	2	12 h
	11	274	187	20,6	0	
	12	276	190	20,4	0	
	13	277	195	19,8	2	14 h
	14	274	191	20,2	0	
	15	276	191	20,8	0	
25%	16	322	282	12,5	3	6 h
	17	323	283	12,4	0	
	18	324	287	11,7	0	
	19	327	294	11,4	3	8 h
	20	328	295	11,2	0	
	21	325	293	10,9	0	
	22	333	300	12,2	3	10 h
	23	328	297	11,5	0	
	24	319	277	10,6	0	
	25	334	304	11,3	3	12 h
	26	338	308	10,8	0	
	27	330	302	11	0	
	28	322	292	11,7	3	14 h
	29	322	295	10,3	0	
	30	324	296	11,6	0	

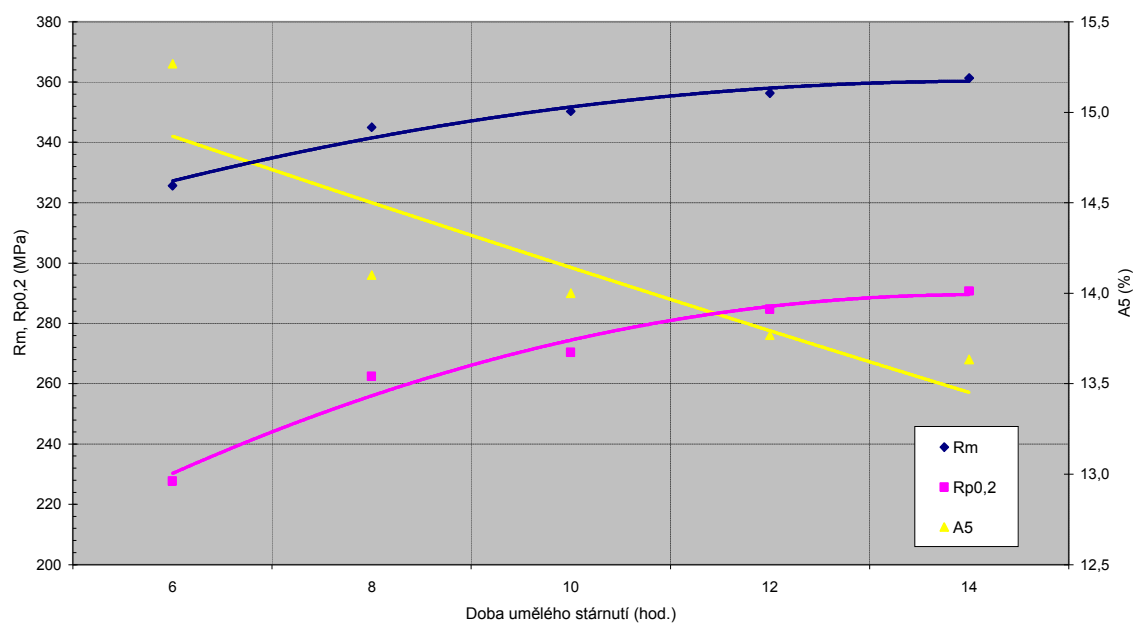
Tab. 3.6.6 – Výsledky tahových zkoušek. Trubky vytvrzené při 160°C.

Redukce	Č.vzorku	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A5 (%)	FN	Doba vytvrz.
0%	1	274	195	21,3	2	6 h
	2	277	198	20,3	0	
	3	278	200	21,4	0	
	4	291	218	19,8	2	8 h
	5	288	221	18,7	0	
	6	289	217	18,6	0	
	7	295	228	17,3	3	10 h
	8	293	231	16,7	0	
	9	296	231	17,5	0	
	10	305	240	17,2	3	12 h
	11	297	231	16,9	0	
	12	298	236	17,4	0	
	13	300	238	17,4	3	14 h
	14	296	236	17,7	0	
	15	300	238	16	0	
25%	16	333	307	10,9	3	6 h
	17	328	303	11,1	0	
	18	332	307	10,8	0	
	19	321	300	10,9	3	8 h
	20	318	298	10	0	
	21	316	294	11,3	0	
	22	321	302	9,8	3	10 h
	23	316	298	10,8	0	
	24	314	295	10,6	0	
	25	318	301	11,1	2	12 h
	26	319	302	10,6	0	
	27	319	302	9,7	0	
	28	314	296	9,8	2	14 h
	29	333	316	9,7	0	
	30	295	279	9,9	0	

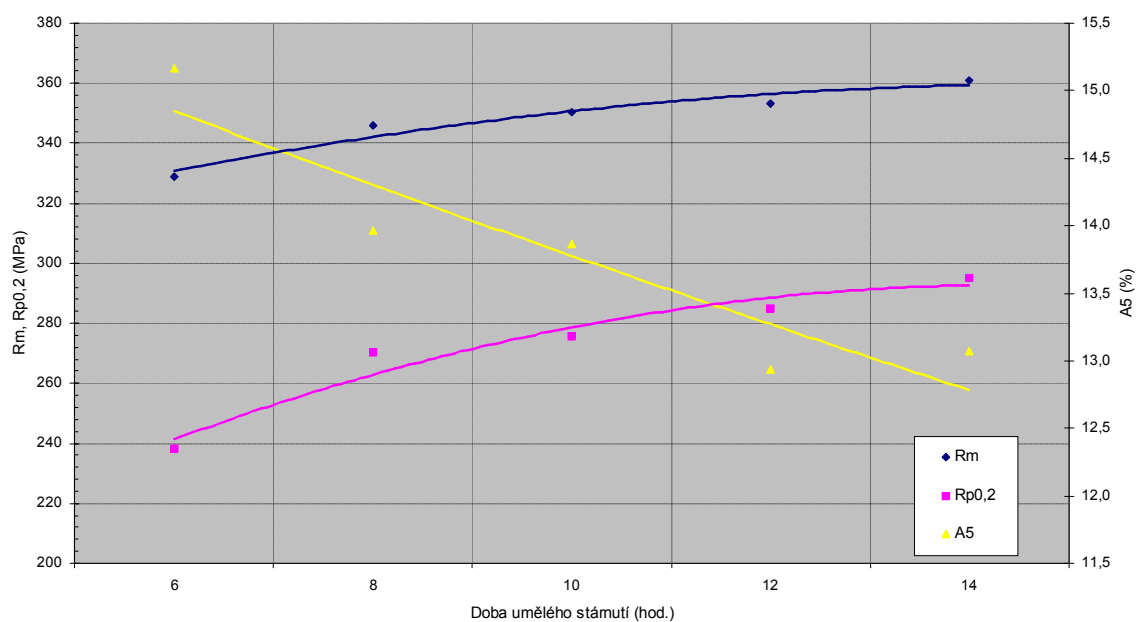
Tab. 3.6.7 – Výsledky tahových zkoušek. Trubky vytvrzené při 170°C.

Redukce	Č.vzorku	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A5 (%)	FN	Doba vytvrz.
0%	1	289	227	15,9	2	6 h
	2	290	229	15,3	0	
	3	285	228	14,6	0	
	4	295	243	13,9	2	8 h
	5	294	243	13,8	0	
	6	295	244	13,9	0	
	7	293	240	14,1	2	10 h
	8	296	244	13,7	0	
	9	289	239	14,1	0	
	10	297	245	14,1	2	12 h
	11	303	250	14,9	0	
	12	298	241	14,9	0	
	13	298	248	14,2	2	14 h
	14	300	249	14,7	0	
	15	304	254	14,4	0	
25%	16	320	302	9	1	6 h
	17	311	293	9,2	0	
	18	315	297	9,5	0	
	19	315	300	8,7	1	8 h
	20	313	298	8,8	0	
	21	317	301	8,9	0	
	22	313	297	8,7	2	10 h
	23	293	279	9	0	
	24	330	314	9,3	0	
	25	314	299	9,7	2	12 h
	26	316	302	9	0	
	27	315	301	8,2	0	
	28	310	294	8,6	2	14 h
	29	313	300	8,5	0	
	30	315	300	8,5	0	

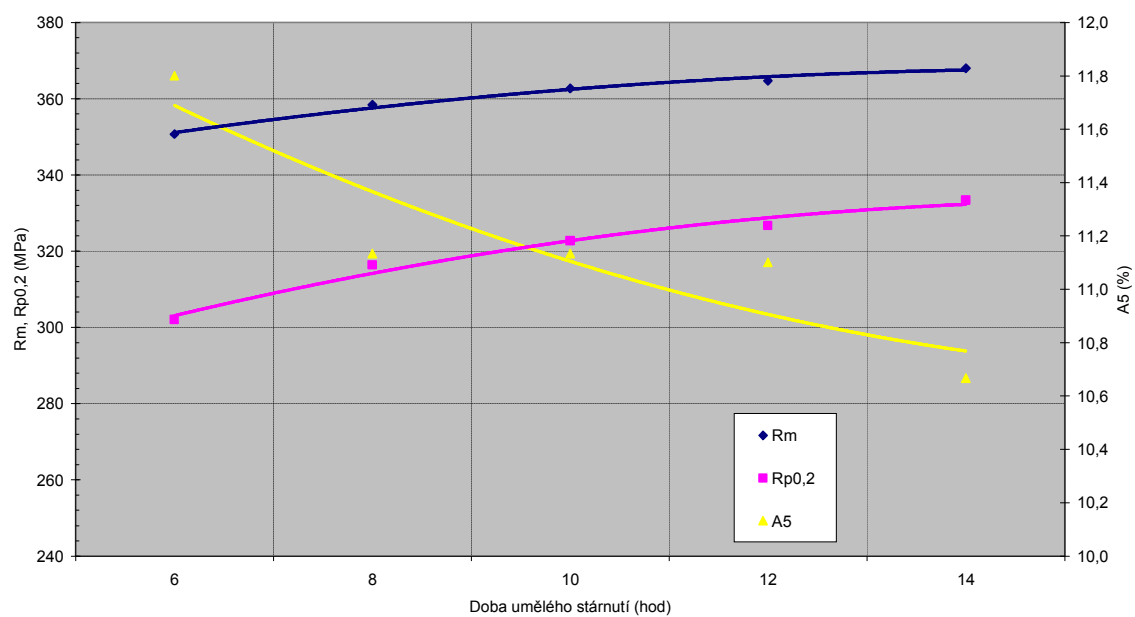
Obr.3.6.1 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 0%, vytvrzovací křivka při 150°C



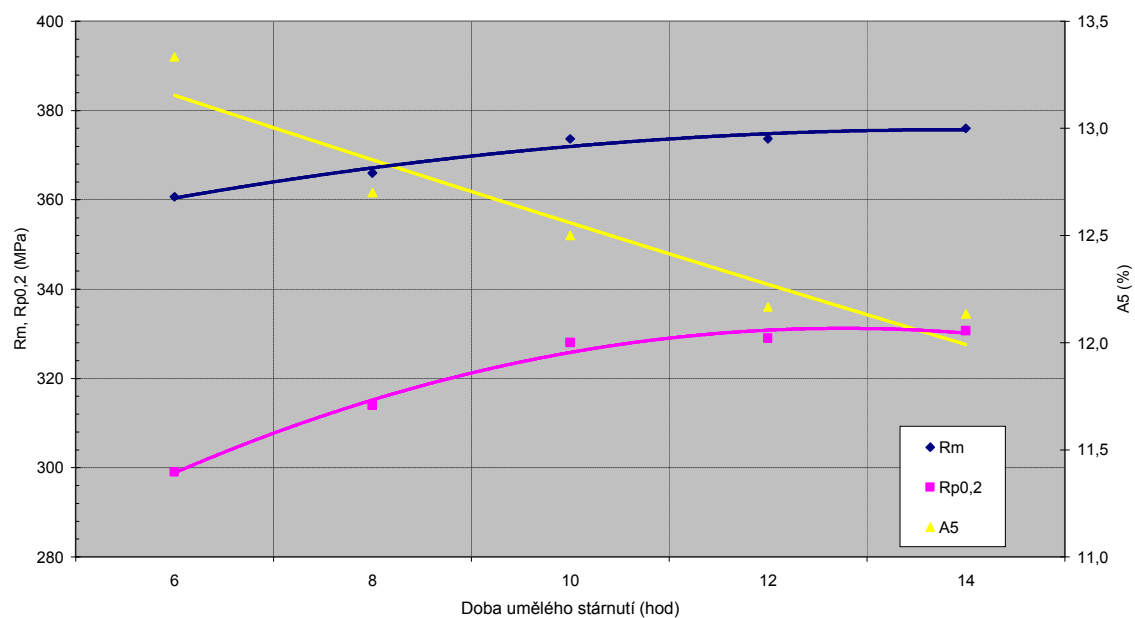
Obr.3.6.2 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 1,5%, vytvrzovací křivka při 150°C



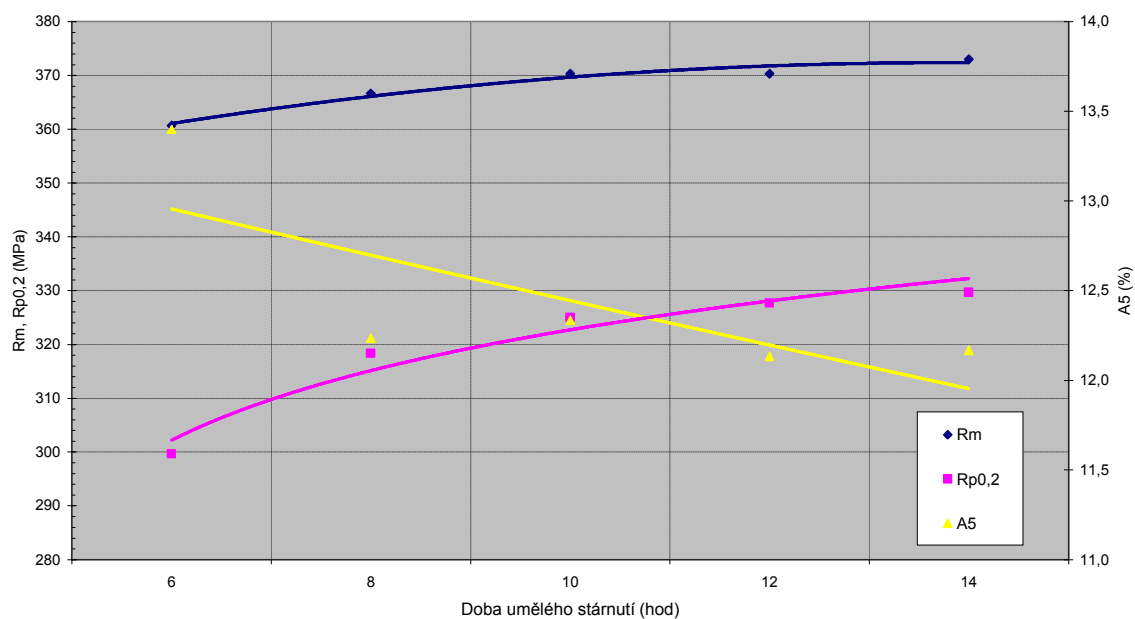
Obr.3.6.3 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 7,7%, vytvrzovací křivka při 150°C



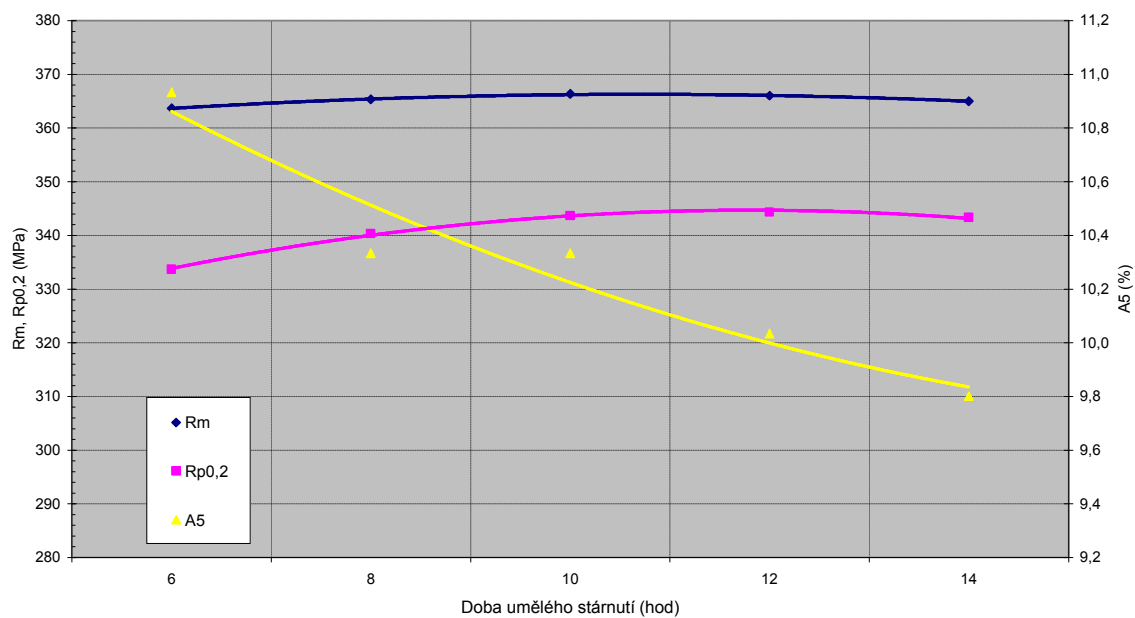
Obr.3.6.4 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 0%, vytvrzovací křivka při 160°C



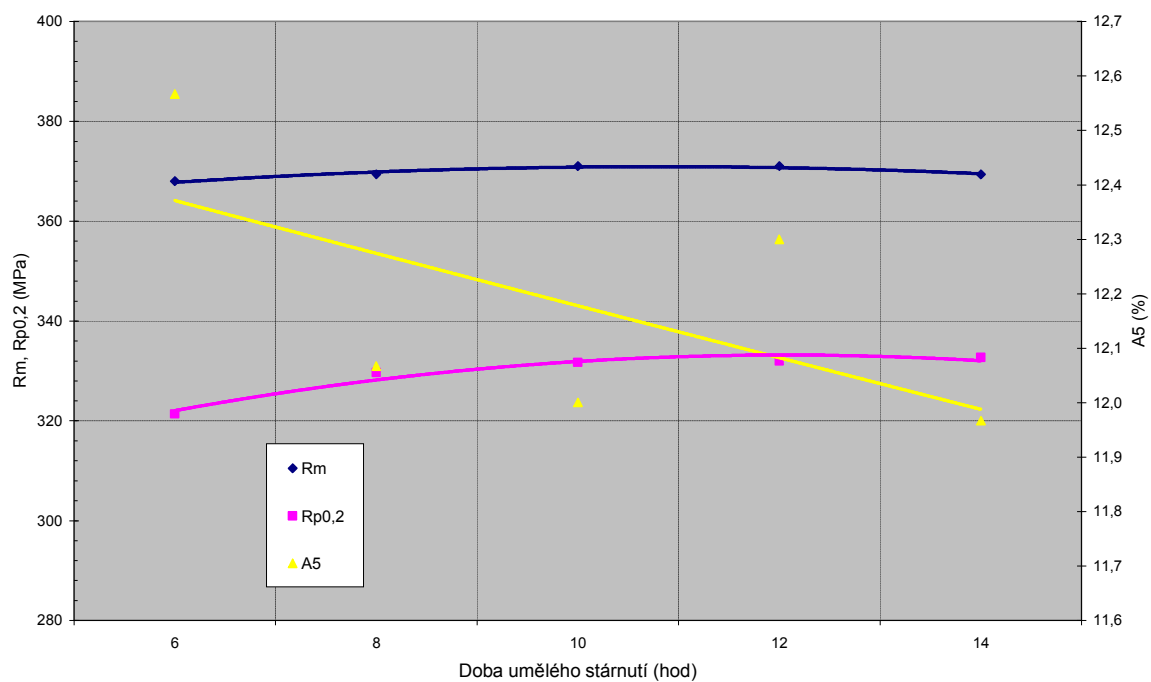
Obr.3.6.5 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 1,5%, vytvrzovací křivka při 160°C



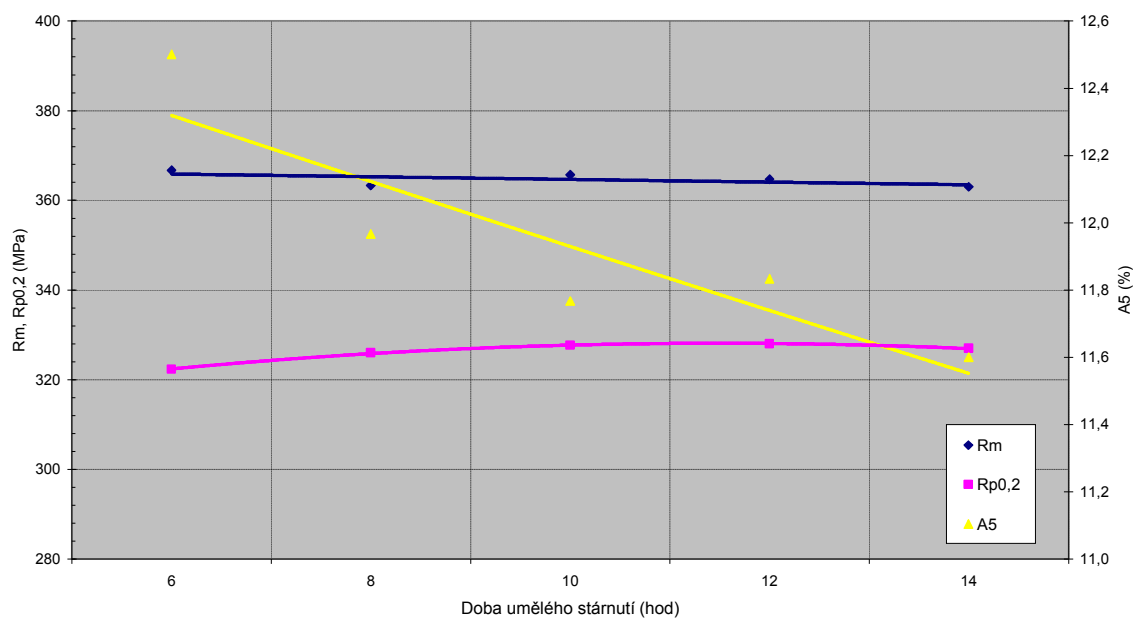
Obr.3.6.6 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 7,7%, vytvrzovací křivka při 160°C



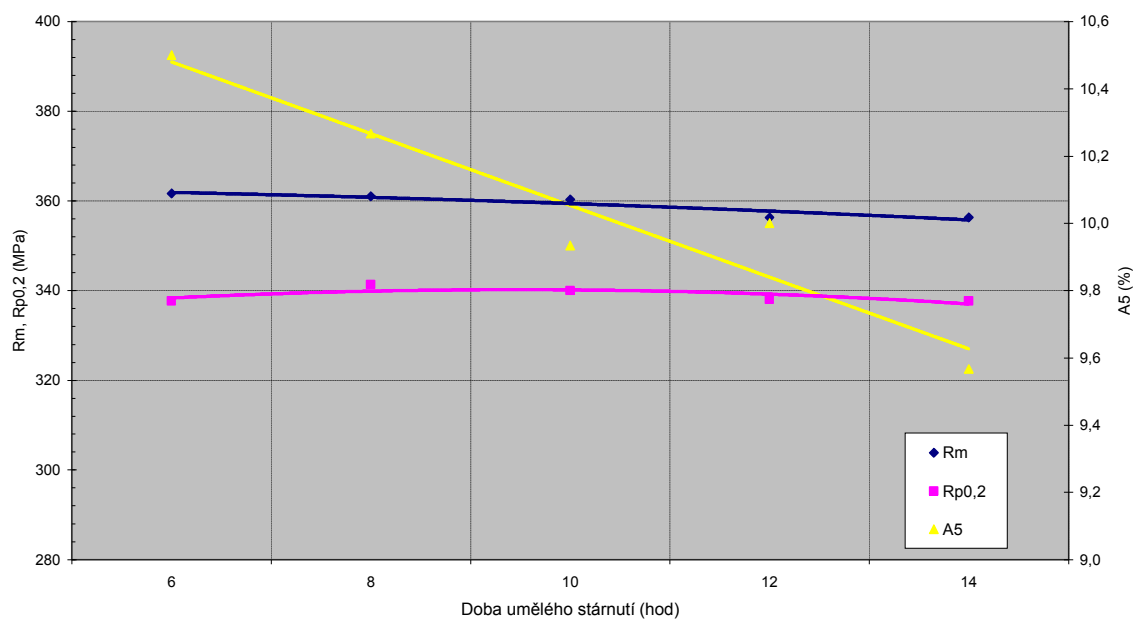
Obr.3.6.7 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 0%, vytvrzovací křivka při 170°C



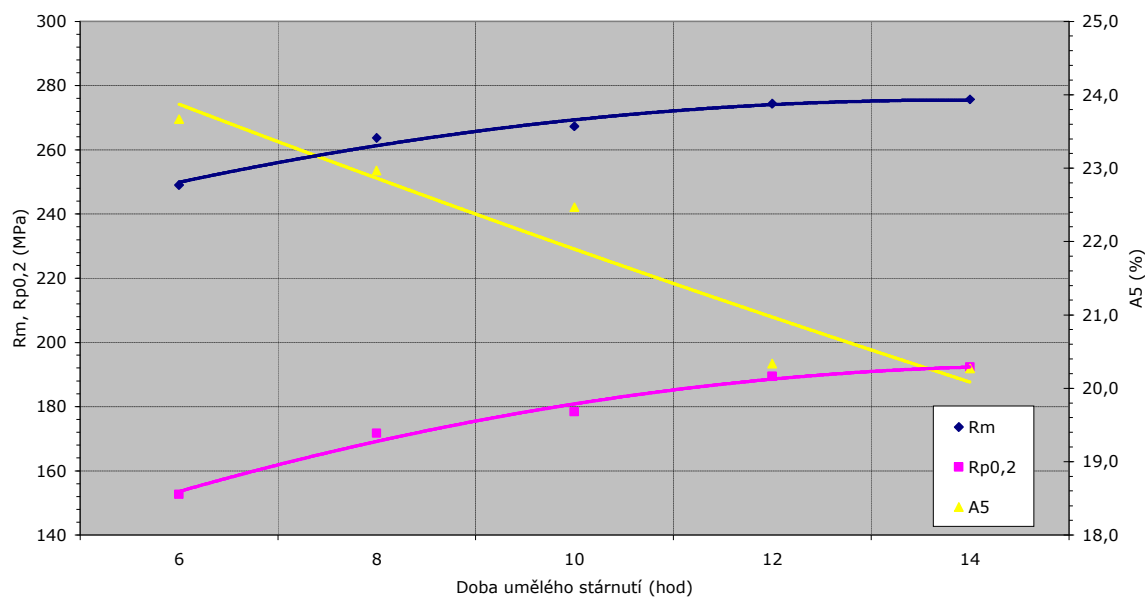
Obr.3.6.8 - Tyč $\phi 27\text{mm}$, deformace za studena 1,5%, vytvrzovací křivka při 170°C



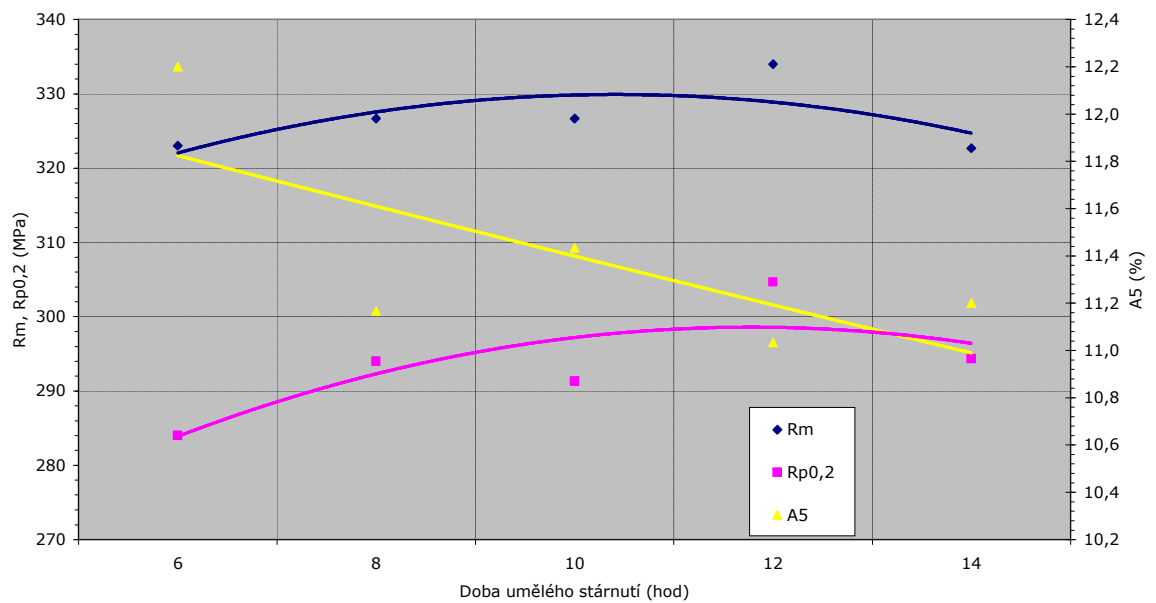
Obr.3.6.9 - Tyč $\phi 26\text{mm}$, deformace za studena 7,7%, vytvrzovací křivka při 170°C



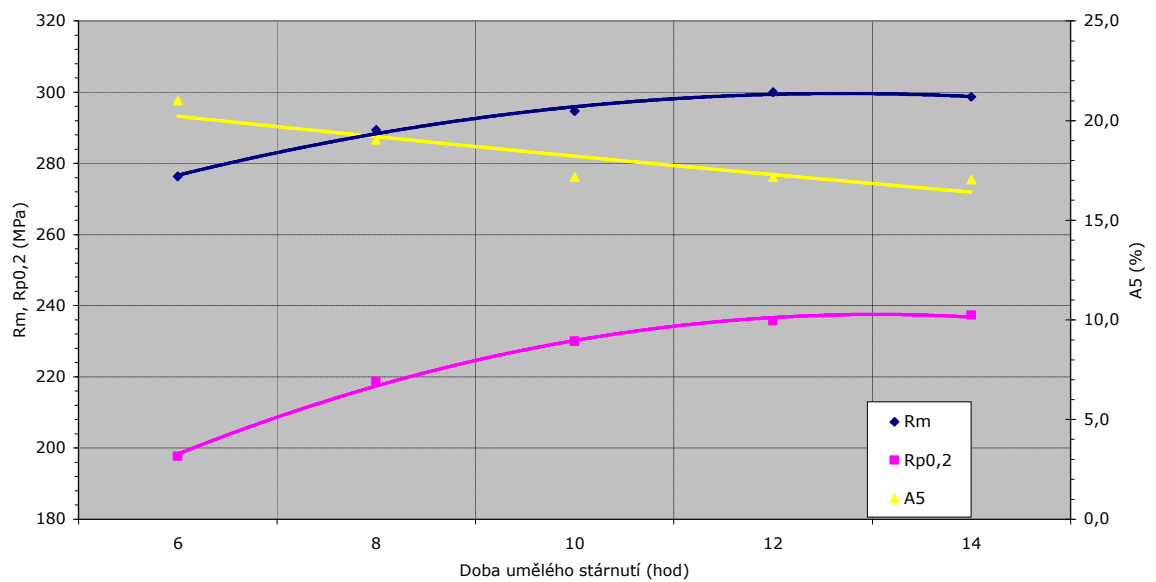
Obr.3.6.13 - Trubky, deformace za studena 0%, vytvrzovací křivka při 150°C



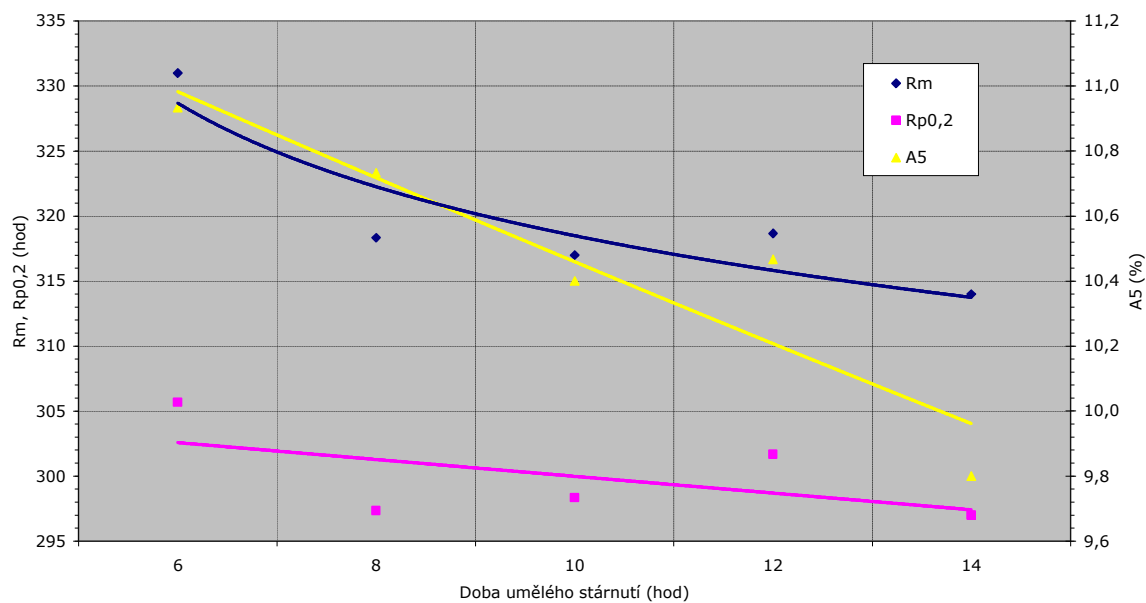
Obr.3.6.14 - Trubky, deformace za studena 25%, vytvrzovací křivka při 150°C



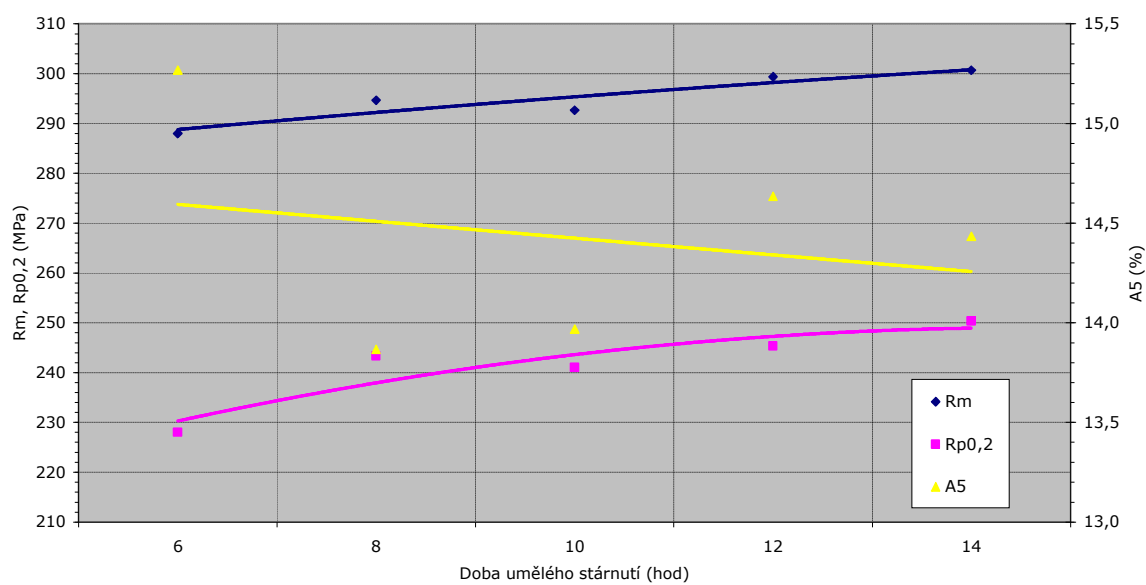
Obr.3.6.15 - Trubky, deformace za studena 0%, vytvrzovací křivka při 160°C



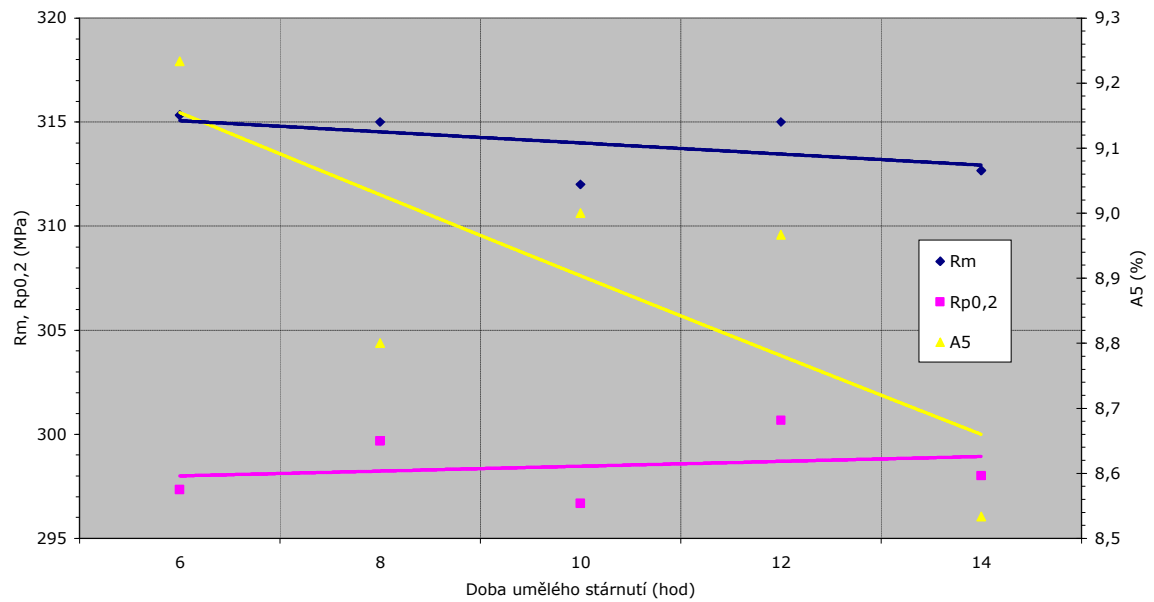
Obr.3.6.16 - Trubky, deformace za studena 25%, vytvrzovací křivka při 160°C



Obr.3.6.17 - Trubky, deformace za studena 0%, vytvrzovací křivka při 170°C



Obr.3.6.18 - Trubky, deformace za studena 25%, vytvrzovací křivka při 170°C



Alcan Decin Extrusions s.r.o.
MECHANICKÝ PROTOKOL

Tisknuto: 26.01.2005
12:03:22

Firma, místo: ing.PLACEK

Cislo atestu: 53/210IS-I-05
Cislo zakazky: 1
Objednací listek: 30904

Vyrobek: Nazev: TYCE 27MM
Rozm. norma:
TDP:
SLITINA: 6023
Stav: T6
Normy:

160°C

Vysledky mechanickych zkousek

Predpis: Rm min:		Rp min:	A min:		HB min:		G(20):		
max:		max:	max:		max:				
Cislo zkousky	Zkusebni vzorek		Rm Pevnost		Rp mez 0,2		Taznost A		
Por.	Oznac.	Kruhova tyc	N	MPa	N	MPa	L0	L1	%
1	1	16.000	72110	359	59610	296	80.00	90.80	13.5
2	2	16.000	73210	364	60710	302	80.00	90.80	13.5
3	3	16.000	72110	359	60210	299	80.00	90.40	13.0
4	4	16.000	73910	368	63310	315	14.00	15.79	12.8
5	5	16.000	72810	362	62510	311	80.00	90.32	12.9
6	6	16.000	73910	368	63510	316	80.00	89.92	12.4
7	7	16.000	75010	373	66010	328	80.00	89.76	12.2
8	8	16.000	75110	374	65510	326	80.00	90.08	12.6
9	9	16.000	75210	374	66310	330	80.00	90.16	12.7
10	10	16.000	75010	373	66410	330	80.00	89.76	12.2

Cislo Por.	Tavba	Sarze	Pec	Vysledky ostatnich zkousek				Vysledek protokolu	
				HB	FN	G20(S)	P	R	
1	0.0000	0	0		3				
2	0.0000	0	0		0				
3	0.0000	0	0		0				
4	0.0000	0	0		2				
5	0.0000	0	0		0				
6	0.0000	0	0		0				
7	0.0000	0	0		2				
8	0.0000	0	0		0				
9	0.0000	0	0		0				
10	0.0000	0	0		3				

Odbor řízení jakosti
mechanická zkušebna 1

Poznámka: 160°C

Decin dne 26.01.2005

Zkousel: Hájková
Videl:

Obr.3.5.2 – Protokol z mechanické zkoušky provedené na trhačím stroji v podniku Alcan Děčín Extrusions s.r.o. Hodnoty mechanických vlastností uvedené v protokolu jsou pro tyče vytvrzené při 160°C.

Klíčová slova:

Alcan Děčín Extrusions s.r.o.

Hliník

Hliníková slitina

Mechanické vlastnosti hliníkových slitin

Stanal 32

Stárnutí hliníkových slitin

Tepelné zpracování hliníkových slitin

Vytvrditelné slitiny hliníku

Vytvrzování hliníkových slitin

Key words:

Alcan Děčín Extrusions s.r.o.

Aluminium

Aluminium Alloy

Aluminium Alloys Age Hardening

Aluminium Alloy Heat Treatment

Heat Treatable Aluminium Alloys

Mechanical Properties of Aluminium Alloys

Stanal 32

Prohlášení:

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 26.května 2006

.....

podpis